

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA – UFSC**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – PPGEC**

**COMPRESSIBILIDADE E RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE  
REJEITOS DE BENEFICIAMENTO DE CARVÃO MINERAL EM  
EQUIPAMENTOS DE GRANDES DIMENSÕES**

**Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC, para a obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil.**

**RODRIGO ANDRÉ HUMMES**

**Florianópolis-SC**

**2007**

**COMPRESSIBILIDADE E RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE  
REJEITOS DE BENEFICIAMENTO DE CARVÃO MINERAL EM  
EQUIPAMENTOS DE GRANDES DIMENSÕES**

**RODRIGO ANDRÉ HUMMES**

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de MESTRE em Engenharia Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Prof. Marciano Maccarini, Ph.D. – Orientador  
Departamento de Engenharia Civil - UFSC

Prof. Dr. Glicério Trichês  
Coordenador do PPGEC - UFSC

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Leto Momm  
Departamento de Engenharia Civil - UFSC

Prof. Dr. Orlando Martini de Oliveira  
Departamento de Engenharia Civil - UFSC

Prof. Dr. Paulo Teixeira da Cruz  
Departamento de Engenharia Civil - USP

Dedico este trabalho aos meus pais, João Hédio (*in memoriam*) e Eunice Maria, pelo amor, dedicação e incentivo, e à memória de meu avô materno, Domingos Taffarel, exemplo de vida.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha mãe, pela minha vida, amor, incentivo e por ter propiciado condições para realização deste trabalho.

À minha querida amiga Fernanda Amorim, pelo incentivo e compreensão.

Ao meu orientador, Marciano Maccarini, pela amizade, orientação, incentivo e sugestões, além do conhecimento transmitido.

Ao geólogo Vilson Simon pela ajuda e amizade.

Ao engenheiro Edi Assini Jr. pelo apoio prestado na montagem de equipamentos.

À empresa Rio Deserto Ltda pelo transporte do material utilizado nos ensaios.

À CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - pela bolsa de estudos que ajudou a viabilizar este trabalho.

À CISER Porcas e Parafusos S/A pela doação dos parafusos utilizados na montagem do equipamento de cisalhamento direto.

Finalmente, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram no desenvolvimento dos equipamentos e na realização de ensaios.



## SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS .....	xi
LISTA DE FIGURAS .....	xiv
LISTA DE TABELAS .....	xxi
RESUMO .....	xxiii
ABSTRACT .....	xxiv
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	2
1.2.1. Objetivo geral .....	2
1.2.2. Objetivos específicos .....	2
1.3. JUSTIFICATIVAS .....	3
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	3
CAPÍTULO 2 – A MINERAÇÃO DE CARVÃO NO BRASIL .....	5
2.1. INTRODUÇÃO .....	5
2.1.1. Histórico .....	5
2.1.2. Recursos e reservas .....	7
2.1.3. Perspectivas de uso futuro .....	8
2.2. GEOLOGIA .....	8
2.2.1. Introdução .....	8
2.2.2. Geologia geral .....	9
2.2.3. Formação Rio Bonito .....	10
2.2.3.1. Membro Triunfo .....	12
2.2.3.2. Membro Paraguaçu .....	12
2.2.3.3. Membro Siderópolis .....	12
2.3. ASPECTOS TÉCNICOS DA MINERAÇÃO .....	15
2.3.1. Introdução .....	15
2.3.2. Lavra .....	16
2.3.2.1. Lavra a céu-aberto .....	16
2.3.2.2. Lavra subterrânea .....	16
2.3.3. Beneficiamento .....	17
2.3.4. Deposição de rejeitos .....	20

2.4. POLUIÇÃO CAUSADA PELOS REJEITOS .....	21
2.4.1. Oxidação da pirita.....	21
2.4.2. Isolamento dos rejeitos .....	22
2.5. DEPÓSITOS DE REJEITO.....	25
2.5.1. Introdução.....	25
2.5.2. Análises geomecânicas .....	27
2.6. REJEITOS DE BENEFICIAMENTO.....	28
2.6.1. Caracterização dos rejeitos grossos .....	29
CAPÍTULO 3 – COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PEDREGULHOS E	
ENROCAMENTOS .....	32
3.1. INTRODUÇÃO.....	32
3.2. FATORES INTERVENIENTES.....	32
3.2.1. Estado de tensão .....	33
3.2.2. Características das partículas.....	36
3.2.2.1. Resistência ao fraturamento .....	36
3.2.2.2. Forma.....	37
3.2.2.3. Coeficiente de atrito.....	38
3.2.2.4. Estado de alteração .....	38
3.2.3. Características do meio granular .....	39
3.2.3.1. Distribuição granulométrica .....	39
3.2.3.2. Estado de compacidade .....	40
3.2.3.3. Adição de água .....	40
3.2.3.4. Fluência .....	41
3.3. ENSAIOS DE LABORATÓRIO DE GRANDES DIMENSÕES .....	41
3.3.1. Compressibilidade .....	41
3.3.1.1. Compressão Unidimensional.....	41
3.3.1.2. Compressibilidade em câmaras triaxiais .....	42
3.3.2. Resistência ao cisalhamento .....	42
3.3.2.1. Cisalhamento Direto.....	42
3.3.2.2. Equipamentos Triaxiais e de Deformação Plana.....	44
3.4. REJEITOS DE BENEFICIAMENTO CARVÃO MINERAL.....	44
3.4.1. Introdução.....	44
3.4.2. Estudos de Maccarini e Hummes (2004).....	45

3.4.2.1. Caracterização física.....	45
3.4.2.2. Resistência ao cisalhamento .....	46
3.4.2.3. Compressibilidade .....	49
3.4.2.4. Considerações finais .....	51
<b>CAPÍTULO 4 – DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO</b>	
<b>DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES .....</b>	<b>53</b>
4.1. INTRODUÇÃO.....	53
4.2. DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO .....	53
4.2.1. Introdução.....	53
4.2.2. Caixa de cisalhamento .....	57
4.2.3. Polias e chapas de reação horizontal .....	60
4.2.3.1. Transferência de carga.....	60
4.2.3.2. Deslocamento vertical .....	61
4.2.3.3. Rotação .....	61
4.2.3.4. Deslocamento transversal .....	62
4.2.4. Conjuntos de trilhos.....	62
4.2.4.1. Redução da forças de atrito .....	63
4.2.4.2. Deslocamento transversal .....	63
4.2.5. Pórtico horizontal .....	64
4.2.6. Aplicação de carga.....	64
4.2.6.1. Esforço vertical de consolidação .....	64
4.2.6.2. Esforço horizontal cisalhante .....	65
4.3. ENSAIO EXPLORATÓRIO .....	66
4.3.1. Introdução.....	66
4.3.2. Estágio de consolidação.....	66
4.3.3. Estágio de cisalhamento .....	68
4.3.4. Avaliação do equipamento .....	71
<b>CAPÍTULO 5 – MATERIAIS DE ESTUDO .....</b>	<b>73</b>
5.1. INTRODUÇÃO.....	73
5.2. REJEITOS BARRO BRANCO.....	74
5.2.1. Depósitos de rejeitos.....	75
5.3. REJEITOS BONITO .....	76
5.3.1. Depósito de rejeitos .....	76

5.4. COLETA DE AMOSTRAS .....	78
CAPÍTULO 6 – PROGRAMA E PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS .....	79
6.1. INTRODUÇÃO.....	79
6.2. ENSAIOS DE CAMPO.....	79
6.2.1. Massa específica aparente .....	79
6.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO .....	81
6.3.1. Análise granulométrica.....	81
6.3.2. Massa específica das partículas .....	81
6.3.3. Índices de vazios máximo $e_{\text{máx}}$ e mínimo $e_{\text{mín}}$ .....	82
6.3.4. Índice de forma.....	82
6.3.5. Resistência à abrasão.....	82
6.4. ENSAIOS MECÂNICOS.....	83
6.4.1. COMPRESSÃO UNIDIMENSIONAL DE GRANDES DIMENSÕES .....	84
6.4.1.1. Equipamento.....	84
6.4.1.2. Procedimentos de ensaio .....	86
6.4.1.3. Cálculo do ensaio.....	91
6.4.2 CISALHAMENTO DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES .....	93
6.4.2.1. Procedimentos de ensaio .....	93
6.4.2.2. Cálculo do ensaio.....	96
CAPÍTULO 7 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	98
7.1. INTRODUÇÃO.....	98
7.2. ENSAIOS DE CAMPO.....	98
7.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO .....	99
7.3.1. Análise granulométrica.....	99
7.3.2. Massa específica das partículas .....	101
7.3.3. Índices de vazios máximos e mínimos e densidade relativa .....	101
7.3.4. Índice de forma.....	102
7.3.5. Resistência à abrasão.....	102
7.4. ENSAIOS DE COMPRESSÃO UNIDIMENSIONAL DE GRANDES DIMENSÕES .....	103
7.4.1. Introdução.....	103
7.4.2. Rejeito Barro Branco .....	105
7.4.2.1. Força vertical total vs força de atrito total .....	105
7.4.2.2. Deformação vertical específica vs tensão vertical líquida média .....	106

7.4.2.3. Tensão vertical líquida média vs índice de vazios.....	107
7.4.2.4. Tensão vertical líquida média vs tensão horizontal média .....	108
7.4.2.5. Quebra de partículas .....	111
7.4.3. Rejeito Bonito.....	112
7.4.3.1. Força vertical total vs força de atrito total .....	112
7.4.3.2. Deformação vertical específica vs tensão vertical líquida média .....	113
7.4.3.3. Tensão vertical líquida média vs índice de vazios.....	114
7.4.3.4. Tensão vertical líquida média vs tensão horizontal média .....	115
7.4.3.5. Quebra de partículas .....	117
7.4.4. Análise comparativa .....	118
7.4.5. Ensaio com modelação física.....	122
7.4.6. Comparação entre ensaios de grandes e pequenas dimensões .....	123
7.5. ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES.....	125
7.5.1. Introdução.....	125
7.5.2. Ensaio BB 100.....	126
7.5.3. Ensaio BB 270.....	130
7.5.4. Ensaio BB 350.....	133
7.5.5. Ensaio BB 430.....	135
7.5.6. Ensaio BB 600.....	137
7.5.7. Análise comparativa .....	141
7.5.8. Envoltória de ruptura .....	144
7.5.9. Quebra de partículas .....	145
7.5.10. Ensaio com modelação física.....	149
7.5.11. Comparação entre ensaios de grandes e pequenas dimensões .....	152
7.5.12. Comparação com resultados da bibliografia .....	155
CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	158
8.1. INTRODUÇÃO.....	158
8.2. CONCLUSÕES GERAIS .....	158
8.3. CONCLUSÕES ESPECÍFICAS .....	158
8.3.1. Compressibilidade .....	158
8.3.2. Resistência ao cisalhamento .....	159
8.4. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	160
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	162

## APÊNDICE I – RESULTADOS DETALHADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO

UNIDIMENSIONAL .....	168
I.1. INTRODUÇÃO .....	168
I.1. ENSAIO BARRO BRANCO.....	168
I.1.1. Curvas tempo vs tensão vertical líquida média vs deformação vertical acumulada...	168
I.1.2. Curvas força de atrito vs força vertical total .....	176
I.2. ENSAIO BONITO .....	178
I.2.1. Curvas tempo vs tensão vertical líquida média vs deformação vertical acumulada...	178
I.2.2. Curvas força de atrito vs força vertical total .....	186

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Abreviações

ABNT .....	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CPRM .....	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CSN .....	Companhia Siderúrgica Nacional
DNPM .....	Departamento Nacional de Produção Mineral
DNER .....	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT .....	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
JICA .....	<i>Japan International Cooperation Agency</i>
LMS .....	Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC
LVDT .....	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
ME .....	Método de ensaio - DNER
MME .....	Ministério de Minas e Energia
NBR .....	Norma Brasileira
ROM .....	<i>Run-of-mine</i> , minério bruto retirado pela lavra
SAE .....	<i>Society of Automotive Engineers - EUA</i>
UTE .....	Usina Termelétrica
UFSC .....	Universidade Federal de Santa Catarina

### Símbolos

$B_g$ .....	Grau de fraturamento das partículas
$C_c$ .....	Coeficiente de curvatura
$C_f$ .....	Coeficiente de forma de partículas
$C_n$ .....	Comprimento da partícula $n$
$C_u$ .....	Coeficiente de uniformidade
$d_{m\acute{a}x}$ .....	Diâmetro máximo de partículas
$d_m$ .....	Dimensão média das partículas (Marsal, 1973)
$D_i$ .....	Dimensão média de uma partícula $i$
$e, e_{m\acute{a}x}, e_{m\acute{i}n}$ ...	Índice de vazios, índice de vazios máximo e índice de vazios mínimo, respectivamente
$e_o$ .....	Índice de vazios inicial da amostra
$e_s$ .....	Espessura da parede da célula de compressão unidimensional

$E$ .....	Módulo de elasticidade
$E_n$ .....	Espessura da partícula $n$
$F_{at}$ .....	Força de atrito entre o corpo de prova e as paredes no ensaio de compressão unidimensional
$\phi'$ .....	Ângulo de atrito interno efetivo
$\gamma_g$ .....	Massa específica das partículas
$\gamma_h$ .....	Massa específica aparente úmida
$\gamma_n$ .....	Massa específica aparente natural
$\gamma_s$ .....	Massa específica aparente seca
$h$ .....	Teor de umidade do solo
$I_F$ .....	Índice de forma das partículas
$k$ .....	Coefficiente de permeabilidade
$K_0$ .....	Coefficiente de empuxo no repouso
$\lambda$ .....	Parâmetro de resistência ao esmagamento das partículas (Marsal, 1973)
$\eta$ .....	Parâmetro de resistência ao esmagamento das partículas (Marsal, 1973)
$P_a$ .....	Resistência ao esmagamento das partículas (Marsal, 1973)
$p_i$ .....	Massa de uma partícula $i$
$pH$ .....	Potencial hidrogênico
$\psi$ .....	Distorção angular
$R_1$ .....	Rejeito grosso tipo 1
$R_2$ .....	Rejeito grosso tipo 2
$R_3$ .....	Rejeito grosso tipo 3
$r$ .....	Raio da célula de compressão unidimensional
$S$ .....	Grau de saturação
$\sigma_1$ .....	Tensão principal maior
$\sigma_2$ .....	Tensão principal intermediária
$\sigma_3$ .....	Tensão principal menor
$\sigma'$ .....	Tensão normal efetiva
$\sigma_n$ .....	Tensão normal total
$\sigma_r$ .....	Tensão normal radial no ensaio de compressão unidimensional
$\sigma_c$ .....	Tensão de tração na parede da célula de compressão unidimensional
$\varepsilon'_c$ .....	Deformação específica na parede da célula de compressão unidimensional



$\tau$ .....	Tensão cisalhante
$\nu$ .....	Coeficiente de Poisson
$v$ .....	Volume total da amostra (Veiga Pinto, 1979)
$v_f$ .....	Volume de partículas fraturadas no ensaio mecânico (Veiga Pinto, 1979)

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Produção nacional de carvão bruto ROM, de 1965 até 2004 .....	7
Figura 2.2 - Coluna estratigráfica parcial da bacia carbonífera catarinense.....	10
Figura 2.3 - Perfil litológico da Formação Rio Bonito (CPRM, 2000).....	11
Figura 2.4 - Pátio de beneficiamento da Mina do Verdinho, de propriedade da Carbonífera Criciúma S/A, localizada em Forquilha-SC. ....	18
Os números da Figura 2.4 indicam:.....	18
Figura 2.5 - Lavador de Mina do Verdinho, Forquilha-SC.....	19
Figura 2.6 - Espalhamento de rejeito em depósito. Mina Bonito, de propriedade da Carbonífera Catarinense Ltda., localizada em Lauro Müller-SC .....	20
Figura 2.7 - Setor antigo e sem controle do depósito de rejeitos da Mina Cooperminas, em Forquilha-SC (em dezembro de 2005) .....	23
Figura 2.8 - Ortofotocarta de área próxima às localidades de Vila Fiorita e Vila Funil, ..... município de Siderópolis-SC (DNPM, 2002) .....	24
Figura 2.9 - Depósito da Mina Esperança, de propriedade da Carbonífera Metropolitana S/A, em Treviso-SC.....	25
Figura 2.10 - Seção transversal tipo de depósito de rejeitos .....	26
Figura 2.11 - Topo de depósito revegetado a com drenagem externa.....	27
Figura 2.12 - Ocorrência de trincas de tração devido a recalques diferenciais (modificado de Qian <i>et al.</i> , 2002).....	28
Figura 2.13 - Rejeitos grossos Barro Branco R <sub>1</sub> e R <sub>2</sub> da Mina Cooperminas, localizada em Forquilha-SC .....	29
Figura 2.14 - Curvas granulométricas típicas de frações R <sub>1</sub> , R <sub>2</sub> e R <sub>3</sub> para rejeitos Barro Branco (ZETA-IESA, 1983).....	30
Figura 3.1 - Variação do ângulo de atrito interno com a tensão normal efetiva no plano de ruptura em enrocamentos (Leps, 1970 e Indraratna <i>et al.</i> 1993, <i>apud</i> Maia, 2001).....	34
Figura 3.2 - Envoltórias de ruptura não-lineares (adaptado de Charles e Watts, 1980).....	35
Figura 3.3 - Evolução de descontinuidades durante ensaios de cisalhamento direto com corpos de prova de caulinita (modificado de Morgenstern e Tchalenko, 1967).....	43
Figura 3.4 – Curvas granulométricas de campo (modificado de Maccarini e Hummes, 2004) ....	45
Figura 3.5 - Envoltórias de ruptura dos rejeitos Barro Branco e Bonito com curvas granulométricas paralelas às de campo (modificado de Maccarini e Hummes, 2004) .....	47

Figura 3.6 - Rejeito Barro Branco: curvas granulométricas antes e depois dos ensaios (modificado de Maccarini e Hummes, 2004) .....	48
Figura 3.7 - Rejeito Bonito: curvas granulométricas antes e depois dos ensaios (modificado de Maccarini e Hummes, 2004) .....	48
Figura 3.8 - Envoltórias de ruptura do rejeito Bonito com curvas granulométricas paralelas e não-paralelas (modificado de Maccarini e Hummes, 2004) .....	49
Figura 3.9 - Curva de compressibilidade do rejeito Barro Branco, curva paralela com $d_{máx} = 7,9\text{mm}$ (modificado de Maccarini e Hummes, 2004) .....	50
Figura 3.10 - Curva de compressibilidade do rejeito Bonito, curva paralela com $d_{máx} = 7,9\text{mm}$ (modificado de Maccarini e Hummes, 2004) .....	50
Figura 3.11 - Curvas de compressibilidade do rejeito Bonito, curvas granulométricas paralela e não-paralela, com $d_{máx} = 7,9\text{mm}$ (modificado de Maccarini e Hummes, 2004) .....	51
Figura 4.2 - Vista frontal do equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões .....	55
Figura 4.3 - Foto lateral do equipamento .....	56
Figura 4.4 - Foto superior do equipamento .....	56
Figura 4.5 - Detalhe da caixa de cisalhamento .....	57
Figura 4.6 – Detalhe da abertura entre caixas e dos reforços das paredes. ....	57
Figura 4.7 - Placa ranhurada de base .....	58
Figura 4.8 - <i>Top-cap</i> do corpo de prova .....	58
Figura 4.9 - Reforço para aplicação de carga .....	59
Figura 4.10 - Roletes entre caixas .....	59
Figura 4.11 - Polias e chapas de reação horizontal.....	60
Figura 4.12 - Trilhos e roletes inferiores .....	62
Figura 4.13 - Aplicação do esforço vertical .....	65
Figura 4.14 – Vista superior do atuador hidráulico servo-controlado, fixado no Perfil A.....	66
Figura 4.15 - Ensaio exploratório: tensão normal e deformação vertical específica na consolidação .....	67
Figura 4.16 - Ensaio exploratório: deslocamento do pistão horizontal em função do tempo .....	68
Figura 4.17 - Ensaio exploratório: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante vs tensão normal total .....	69
Figura 4.18 - Ensaio exploratório: deformações verticais específicas para cada transdutor de deslocamento .....	70

Figura 4.19 - Ensaio exploratório: paredes laterais internas da parte superior da caixa de cisalhamento .....	70
Figura 4.20 - Ensaio exploratório: deformação cisalhante específica vs deformação vertical específica média vs ângulo de rotação do <i>top-cap</i> .....	71
Figura 5.1 - Localização da minas estudadas .....	73
Figura 5.2 - Pátio de beneficiamento e depósito de rejeitos da Mina Cooperminas .....	74
Figura 5.3 - Setor abandonado do depósito da Mina Cooperminas (dezembro de 2005) .....	75
Figura 5.4 - Pátio de beneficiamento de ROM da Mina Barro Branco .....	76
Figura 5.5 - Ortofotocarta da área do depósito e do pátio de beneficiamento da Mina Barro Branco.....	77
Figura 5.6 - Depósito de rejeitos da Mina Barro Branco .....	77
Figura 6.1 - Abertura de cavas em camada de rejeitos espalhada .....	79
Figura 6.2 - Determinação do volume da cava.....	80
Figura 6.3 - Equipamento de compressão unidimensional de grandes dimensões.....	84
Figura 6.4 – Célula de compressão na posição de compactação dos corpos de prova.....	86
Figura 6.5 - Umedecimento e homogeneização do rejeito .....	87
Figura 6.6 - Placa vibratória utilizada para compactação dos corpos de prova.....	87
Figura 6.7 - Equipamento pronto para início do ensaio .....	88
Figura 6.8 - Corpo de prova após o término do ensaio.....	90
Figura 6.9 - Parte do rejeito coletado para realização de análises granulométricas após o ensaio.....	90
Figura 6.10 - Forças de atrito nas paredes da célula de compressão .....	91
Figura 6.11 - Tensões atuantes nas paredes da célula .....	92
Figura 6.12 - Distribuição de tensões horizontais ao longo das paredes da célula.....	93
Figura 6.13 - Rejeitos espalhados no interior da caixa de cisalhamento .....	94
Figura 6.14 - Placa vibratória PV 2000 parafusada na chapa ranhurada.....	94
Figura 6.15 - Topo do corpo de prova após ensaio .....	96
Figura 7.1 - Distribuição granulométrica dos rejeitos Barro Branco e Bonito .....	100
Figura 7.2 - Ensaio Barro Branco: força vertical total vs força de atrito total.....	105
Figura 7.3 - Ensaio Barro Branco: força vertical total vs porcentagem da força de atrito .....	105
Figura 7.4 - Ensaio Barro Branco: deformação vertical específica vs tensão vertical líquida média .....	106
Figura 7.5 - Ensaio Barro Branco: tensão vertical líquida média vs índice de vazios.....	107
Figura 7.6 - Ensaio Barro Branco: tensão vertical líquida média vs tensão horizontal média ....	108

Figura 7.7 - Ensaio Barro Branco: tensão vertical líquida média vs tensão horizontal média / tensão vertical líquida média .....	109
Figura 7.8 - Ensaio Barro Branco: coeficientes de empuxo no repouso $K_0$ .....	110
Figura 7.9 - Ensaio Barro Branco: curvas granulométricas antes e após o ensaio .....	111
Figura 7.10 - Ensaio Bonito: força vertical total vs força de atrito total .....	112
Figura 7.11 - Ensaio Bonito: força vertical total vs porcentagem da força de atrito .....	113
Figura 7.12 - Ensaio Bonito: deformação vertical específica vs tensão vertical líquida média ..	113
Figura 7.13 - Ensaio Bonito: tensão vertical líquida média vs índice de vazios .....	114
Figura 7.14 - Ensaio Bonito: tensão vertical líquida média vs tensão horizontal média .....	115
Figura 7.15 - Ensaio Bonito: tensão vertical líquida média vs tensão horizontal média / tensão vertical líquida média .....	116
Figura 7.16 - Ensaio Bonito: coeficientes de empuxo no repouso $K_0$ .....	116
Figura 7.17 - Ensaio Bonito: curvas granulométricas antes e após o ensaio .....	117
Figura 7.18 - Comparação: deformação vertical específica vs tensão vertical líquida média .....	118
Figura 7.19 - Comparação: tensão vertical líquida média vs índice de vazios .....	119
Figura 7.20 - Comparação: tensão vertical líquida média vs tensão horizontal média .....	120
Figura 7.21 - Comparação: força vertical total vs força de atrito total para estágios de carregamento .....	121
Figura 7.22 - Comparação: força vertical total vs porcentagem da força de atrito .....	122
Figura 7.23 - Ensaio de pequenas dimensões: tensão vertical vs índice de vazios .....	123
Figura 7.24 - Ensaio Barro Branco grande e pequeno: tensão vertical vs índice de vazios .....	124
Figura 7.25 - Ensaio Bonito grande e pequeno: tensão vertical vs índice de vazios .....	124
Figura 7.26 - Ensaio BB 100: tempo vs deformação vertical específica média vs tensão normal total .....	127
Figura 7.27 - Ensaio BB 100: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante vs tensão normal total .....	127
Figura 7.28 - Ensaio BB 100: deformação cisalhante específica vs deformação vertical específica média vs ângulo de rotação do <i>top-cap</i> .....	128
Figura 7.29 - Ensaio BB 100: curvas de distribuição granulométrica antes e depois do ensaio ..	129
Figura 7.30 - Ensaio BB 270: tempo vs deformação vertical específica média vs tensão normal total .....	130
Figura 7.31 - Ensaio BB 270: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante vs tensão normal total .....	131

Figura 7.32 - Ensaio BB 270: deformação cisalhante específica vs deformação vertical específica média vs ângulo de rotação do <i>top-cap</i> .....	132
Figura 7.33 - Ensaio BB 270: curvas de distribuição granulométrica antes e depois do ensaio .	132
Figura 7.34 - Ensaio BB 350: tempo vs deformação vertical específica média vs tensão normal total .....	133
Figura 7.35 - Ensaio BB 350: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante vs tensão normal total.....	134
Figura 7.36 - Ensaio BB 350: deformação cisalhante específica vs deformação vertical específica média vs ângulo de rotação do <i>top-cap</i> .....	134
Figura 7.37 - Ensaio BB 430: tempo vs deformação vertical específica média vs tensão normal total .....	135
Figura 7.38 - Ensaio BB 430: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante vs tensão normal total.....	136
Figura 7.39 - Ensaio BB 430: deformação cisalhante específica vs deformação vertical específica média vs ângulo de rotação do <i>top-cap</i> .....	136
Figura 7.40 - Ensaio BB 430: curvas de distribuição granulométrica antes e depois do ensaio .	137
Figura 7.41 - Ensaio BB 600: tempo vs deformação vertical específica média vs tensão normal total, consolidação 1 .....	138
Figura 7.42 - Ensaio BB 600: tempo vs deformação vertical específica média vs tensão normal total, consolidação 2 .....	138
Figura 7.43 - Ensaio BB 600: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante vs tensão normal total.....	139
Figura 7.44 - Ensaio BB 600: deformação cisalhante específica vs deformação vertical específica média vs ângulo de rotação do <i>top-cap</i> .....	139
Figura 7.45 - Ensaio BB 600: curvas de distribuição granulométrica antes e depois do ensaio .	140
Figura 7.46 - Ensaios BB: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante - comparação .....	141
Figura 7.47 - Ensaios BB: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante vs tensão normal total - detalhe.....	142
Figura 7.48 - Ensaios BB: deformação cisalhante específica vs deformação vertical específica média .....	143
Figura 7.49 - Ensaios BB: deformação cisalhante específica vs ângulo de rotação do <i>top-cap</i> ..	143
Figura 7.50 - Ensaios BB: envoltórias de ruptura para diferentes deformações cisalhantes.....	144

Figura 7.51 - Ensaio BB: variação de $c$ e $\phi$ com a tensão normal .....	145
Figura 7.52 - Ensaio BB, amostras do Topo: curvas de distribuição granulométrica antes e depois dos ensaios .....	146
Figura 7.53 - Ensaio BB, amostras do Meio: curvas de distribuição granulométrica antes e depois dos ensaios .....	146
Figura 7.54 - Ensaio BB, amostras da Base: curvas de distribuição granulométrica antes e depois dos ensaios .....	147
Figura 7.55 - Ensaio BB: tensão normal total média vs grau de fraturamento $B_g$ .....	148
Figura 7.56 - Ensaio BB: tensão normal total média vs coeficiente de uniformidade $C_u$ .....	149
Figura 7.57 - Ensaio bb: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante .....	150
Figura 7.58 - Ensaio bb: deformação cisalhante específica vs deformação vertical específica. ....	150
Figura 7.59 - Ensaio bb: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante - detalhe.....	151
Figura 7.60 - Ensaio bb: envoltória de ruptura .....	152
Figura 7.61 - Ensaio BB e bb: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante .....	153
Figura 7.62 - Ensaio BB e bb: deformação cisalhante específica vs deformação vertical.....	153
Figura 7.63 - Ensaio BB e bb: deslocamento horizontal vs tensão cisalhante .....	154
Figura 7.64 - Ensaio BB e bb: deslocamento horizontal vs deformação vertical .....	154
Figura 7.65 - Ensaio BB e bb: envoltórias de ruptura.....	155
Figura 7.66 – Comparação de ângulo de atrito interno do Rejeito Barro Branco com dados da bibliografia (modificado de Maia, 2001).....	156
Figura I.1 - Ensaio Barro Branco: estágio 0, contato com o <i>top-cap</i> .....	168
Figura I.2 - Ensaio Barro Branco: estágio 1 de carregamento.....	169
Figura I.3 - Ensaio Barro Branco: estágio 2 de carregamento.....	169
Figura I.4 - Ensaio Barro Branco: estágio 3 de carregamento.....	170
Figura I.5 - Ensaio Barro Branco: estágio 4 de carregamento.....	170
Figura I.6 - Ensaio Barro Branco: estágio 5 de carregamento.....	171
Figura I.7 - Ensaio Barro Branco: estágio 6 de carregamento.....	171
Figura I.8 - Ensaio Barro Branco: estágio 7 de carregamento.....	172
Figura I.9 - Ensaio Barro Branco: estágio 8 de carregamento.....	172
Figura I.10 - Ensaio Barro Branco: estágio 9 de carregamento.....	173
Figura I.11 - Ensaio Barro Branco: estágio 1 de descarregamento .....	173
Figura I.12 - Ensaio Barro Branco: estágio 2 de descarregamento .....	174
Figura I.13 - Ensaio Barro Branco: estágio 3 de descarregamento .....	174

Figura I.14 - Ensaio Barro Branco: estágio 4 de descarregamento .....	175
Figura I.15 - Ensaio Barro Branco: estágio 5 de descarregamento .....	175
Figura I.16 - Ensaio Barro Branco: estágio 6 de descarregamento .....	176
Figura I.17 - Ensaio Barro Branco: força de atrito medida pela Célula de Carga 1.....	176
Figura I.18 - Ensaio Barro Branco: força de atrito medida pela Célula de Carga 2.....	177
Figura I.19 - Ensaio Barro Branco: força de atrito medida pela Célula de Carga 3.....	177
Figura I.20 - Ensaio Bonito: estágio 0, contato com o <i>top-cap</i> .....	178
Figura I.21 - Ensaio Bonito: estágio 1 de carregamento .....	178
Figura I.22 - Ensaio Bonito: estágio 2 de carregamento .....	179
Figura I.23 - Ensaio Bonito: estágio 3 de carregamento .....	179
Figura I.24 - Ensaio Bonito: estágio 4 de carregamento .....	180
Figura I.25 - Ensaio Bonito: estágio 5 de carregamento .....	180
Figura I.26 - Ensaio Bonito: estágio 6 de carregamento .....	181
Figura I.27 - Ensaio Bonito: estágio 7 de carregamento .....	181
Figura I.28 - Ensaio Bonito: estágio 8 de carregamento .....	182
Figura I.29 - Ensaio Bonito: estágio 9 de carregamento .....	182
Figura I.30 - Ensaio Bonito: estágio 1 de descarregamento .....	183
Figura I.31 - Ensaio Bonito: estágio 2 de descarregamento .....	183
Figura I.32 - Ensaio Bonito: estágio 3 de descarregamento .....	184
Figura I.33 - Ensaio Bonito: estágio 4 de descarregamento .....	184
Figura I.34 - Ensaio Bonito: estágio 5 de descarregamento .....	185
Figura I.35 - Ensaio Bonito: estágio 6 de descarregamento .....	185
Figura I.36 - Ensaio Bonito: força de atrito medida pela Célula de Carga 1.....	186
Figura I.37 - Ensaio Bonito: força de atrito medida pela Célula de Carga 2.....	186
Figura I.38 - Ensaio Bonito: força de atrito medida pela Célula de Carga 3.....	187



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Recursos e reservas brasileiras de carvão mineral, em milhões de toneladas .....	8
Tabela 2.2 - Recursos catarinenses de carvão, por camada, em milhões de toneladas .....	13
Tabela 2.3 - Participação das camadas Barro Branco e Bonito Inferior nos recursos de carvão ..	14
Tabela 2.4 - Teores de enxofre de rejeitos Barro Branco e Bonito .....	22
Tabela 2.5 - Porcentagem de rejeito em relação ao carvão bruto (Redivo, 2002).....	29
Tabela 2.6 - Massa específica das partículas de rejeito Barro Branco (ZETA-IESA, 1983) .....	31
Tabela 2.7 - Composição química de rejeitos grossos Barro Branco (ZETA-IESA, 1983).....	31
Tabela 3.1 - Massas específicas das partículas ( $\gamma_g$ ) .....	46
Tabela 3.2 - Massas específicas aparentes secas ( $\gamma_s$ ).....	46
Tabela 3.3 - Índices de vazios máximos $e_{máx}$ , mínimos $e_{mín}$ e de ensaios e densidade relativa....	46
Tabela 6.1 - Tensões verticais totais e líquidas médias dos estágios de carregamento .....	89
Tabela 6.2 - Tensões verticais totais e líquidas médias dos estágios de descarregamento.....	89
Tabela 7.1 – Teores de umidade e massas específicas aparentes de campo.....	98
Tabela 7.2 - Massa específica das partículas e índices de vazios para cada ensaio de campo .....	99
Tabela 7.3 - Índices físicos médios adotados nos ensaios mecânicos .....	99
Tabela 7.4 - Composições granulométricas dos rejeitos Barro Branco e Bonito .....	100
Tabela 7.5 - Coeficientes de uniformidade $C_u$ e de curvatura $C_c$ .....	101
Tabela 7.6 - Massa específica das partículas ( $\gamma_g$ ) .....	101
Tabela 7.7 - Índices de vazios máximos e mínimos .....	102
Tabela 7.8 - Índice de forma do rejeito Bonito .....	102
Tabela 7.9 - Índice de forma do rejeito Barro Branco.....	102
Tabela 7.10 - Perda de massa no ensaio de abrasão (%) .....	103
Tabela 7.11 - Coeficiente de uniformidade $C_u$ e de curvatura $C_c$ .....	111
Tabela 7.12 – Coeficiente de uniformidade $C_u$ e de curvatura $C_c$ .....	118
Tabela 7.13 - Ensaio BB 100: coeficientes de uniformidade e curvatura e grau de fraturamento .....	130
Tabela 7.14 - Ensaio BB 270: coeficientes de uniformidade e curvatura e grau de fraturamento .....	133
Tabela 7.15 - Ensaio BB 430: coeficientes de uniformidade e curvatura e grau de fraturamento .....	137

Tabela 7.16 - Ensaio BB 600: coeficientes de uniformidade e curvatura e grau de fraturamento .....	140
Tabela 7.17 - Grau de fraturamento Bg .....	147
Tabela 7.18 - Coeficientes de uniformidade.....	148
Tabela 7.19 – Comparação de ângulos de atrito interno efetivos.....	157

## RESUMO

O objetivo deste trabalho é avaliar a compressibilidade e a resistência ao cisalhamento de rejeitos de beneficiamento de carvão mineral produzidos na bacia carbonífera catarinense. A máxima dimensão de partícula, de até 75mm, torna necessária a utilização de equipamentos de grandes dimensões para realização de ensaios mecânicos com a granulometria de campo. Os ensaios de compressão unidimensional foram realizados com o equipamento desenvolvido por Pacheco (2005). Para determinação dos parâmetros de resistência foi desenvolvido um equipamento de cisalhamento direto capaz de ensaiar corpos de prova cúbicos de 70cm de lado.

Compressibilidade e resistência foram determinadas para corpos de prova moldados no mesmo grau de compacidade de campo. Foram realizados ensaios de massa específica aparente *in situ* em dois depósitos em operação. Executou-se dois ensaios de compressão unidimensional de grandes dimensões, um com rejeitos Bonito e outro com rejeitos Barro Branco, os dois tipos mais encontrados em Santa Catarina. Com rejeitos Barro Branco executou-se cinco ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões. Também foram realizados ensaios de compressão unidimensional e de cisalhamento direto de pequenas dimensões, utilizando curvas granulométricas paralelas às de campo, com partículas de até 7,9mm de diâmetro.

Comparou-se os resultados dos ensaios de grandes dimensões com os obtidos com os de pequenas dimensões. Finalmente, comparou-se os resultados com os existentes na bibliografia.

Palavras-chave: rejeitos de carvão mineral; compressibilidade; resistência ao cisalhamento; equipamentos de grandes dimensões

## ABSTRACT

The objective of this research is to evaluate the compressibility and shear strength of coal mining processing rejects from south Santa Catarina state, south Brazil. The maximum particle diameter is nearly 75mm. To carry out tests with field particle size distribution it is necessary use large scale equipments. The two main rejects presented in the area were studied: Barro Branco and Bonito. Two one-dimensional compression tests were carry out with an equipment developed by Pacheco (2005), with 100cm diameter and 50cm height. A large scale direct shear equipment was designed and constructed for this research. It is able to test specimens of 70×70×70cm. Five tests were done with Barro Branco rejects.

Two rejects deposits currently in operation were studied. The field dry unit weight and other physical properties were determined. The specimens of laboratory mechanical tests were molded in the field relative density.

Conventional sizes one-dimensional compression and direct shear equipments were also used. It were used parallels gradation curves with 7,9mm maximum particle size. The results were compared with those obtained with large scale tests.

**Keywords:** coal mining rejects; compressibility; shear strength; large scale equipments

## **CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO**

### **1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Um dos principais problemas relacionados com a mineração de carvão no Brasil é a grande quantidade de rejeitos piritosos gerados nos processos de beneficiamento do minério bruto. A pirita ( $\text{FeS}_2$ ) sofre oxidação ao entrar em contato com ar e água, gerando acidez e liberando metais pesados. Caso fiquem expostos às intempéries, sem isolamento, os rejeitos podem sofrer lixiviação pelas águas das chuvas, fazendo com que esses poluentes sejam disseminados nas águas superficiais e sub-superficiais e no solo, causando degradação do meio ambiente.

A forma usual de isolar os rejeitos é depositá-los em aterros controlados, geralmente localizados próximos aos pátios de beneficiamento de minério. O isolamento é obtido por meio de camadas de solo argiloso compactado, construídas na base, na cobertura e, eventualmente, entre patamares dos depósitos. O baixo coeficiente de permeabilidade destas camadas minimiza a saída de efluentes do interior do depósito, bem como a entrada de águas das chuvas. Sistemas de drenagem interna reduzem o acúmulo de efluentes, diminuindo as cargas hidráulicas atuantes sobre as camadas impermeabilizantes de base. Os efluentes são coletados e encaminhados para tratamento, sendo posteriormente descartados na drenagem natural.

Os depósitos podem atingir dezenas de metros de altura e muitos hectares em área. Para exemplificar, na bacia carbonífera catarinense, uma mina de grande porte pode gerar, ao longo de 10 a 15 anos, mais de 10 milhões de metros cúbicos de rejeitos, depositados em aterro ocupando área superior a 50 hectares e altura maior que 30 metros.

Como toda obra de engenharia, os depósitos de rejeitos devem ser projetados e construídos de modo a garantir segurança, funcionalidade e economia, além de reduzir ao mínimo os impactos ao meio ambiente. Portanto, dentre outros estudos, devem ser realizadas análises de estabilidade mecânica dos taludes e previsões de recalques totais e diferenciais. Porém, isto só é possível caso sejam conhecidas as propriedades mecânicas dos rejeitos, isto é, os parâmetros de resistência e compressibilidade.

Até hoje a construção de depósitos seguiu procedimentos preponderantemente empíricos, isto é, repetiram-se práticas adotadas em obras anteriores em que não foram constatados problemas significativos. Porém, este procedimento não é o mais indicado para elaboração de projetos de engenharia, os quais devem primar por métodos científicos.

A principal causa dessa situação talvez seja a pouca importância dada até há poucos anos à deposição de rejeitos. Hoje grande parte da bacia carbonífera catarinense está degradada. Propostas de critérios de projeto e construção de depósitos datam do início da década de 80, com o Projeto ZETA-IESA. Porém, somente no final da década de 90 esses critérios começaram a ser implantados. Esta demora contribuiu fortemente para degradação ambiental. Atualmente ainda existem diversos depósitos lançando efluentes sem tratamento em rios e córregos.

As dimensões das partículas que compõem os rejeitos dificultam a utilização de equipamentos laboratoriais convencionais para determinação dos parâmetros de resistência e compressibilidade. O máximo diâmetro de partícula é da ordem de 75mm. Equipamentos de dimensões convencionais só podem ser utilizados caso a granulometria seja modelada, utilizando curva granulométrica paralela, por exemplo. Só é possível realizar ensaios com a granulometria de campo utilizando equipamentos de grandes dimensões, tal como é feito para enrocamentos.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo geral**

Determinar, por meio de ensaios de laboratório de grandes dimensões, parâmetros de compressibilidade e resistência de rejeitos de beneficiamento de carvão mineral catarinense, gerados na exploração de camadas de carvão Barro Branco e Bonito, a partir do estudo de depósitos de minas em atividade.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

O objetivo geral será atingido por meio dos seguintes objetivos específicos:

- coletar amostras e caracterizar os dois principais tipos de rejeitos gerados na bacia carbonífera catarinense (Barro Branco e Bonito);
- realizar estudos de campo em minas selecionadas para determinar os índices físicos dos rejeitos em depósito;
- projetar e construir um equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões que permita ensaiar corpos de prova cúbicos de 70 centímetros de lado;
- realizar ensaios de compressão unidimensional e de cisalhamento direto de grandes dimensões com as amostras coletadas, conforme seus índices de vazios de campo;
- realizar ensaios de compressão unidimensional e de cisalhamento direto de pequenas dimensões e comparar os resultados com os obtidos nos ensaios de grandes dimensões.

### **1.3. JUSTIFICATIVAS**

A cada dia aumenta mais a preocupação da sociedade com a preservação do meio ambiente. Reflexo disto é o crescente rigor das exigências dos órgãos ambientais federais, estaduais e municipais para aprovação de novos empreendimentos industriais potencialmente poluidores, dentre os quais estão as minas de carvão.

O histórico do setor carbonífero catarinense é de geração de emprego, renda e desenvolvimento, mas também de intensa degradação ambiental, causada em grande parte por aterros de rejeito construídos sem critérios adequados. Sendo assim, é necessário aplicar técnicas de engenharia adequadas com os objetivos de minimizar futuros impactos ambientais e recuperar áreas já degradadas, contribuindo para que, gradualmente, seja revertido o péssimo quadro em que se encontra atualmente grande parte da bacia carbonífera catarinense.

Portanto, é imprescindível o conhecimento do comportamento mecânico dos rejeitos piritosos, ainda hoje insuficiente. Com isto será possível projetar e construir depósitos mais seguros, reduzindo impactos ambientais. Além disso, tal conhecimento poderá permitir maior economia por parte das empresas mineradoras na construção desses depósitos, por meio do aumento de suas alturas e inclinações dos taludes, com a conseqüente redução da área ocupada.

### **1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

A presente dissertação está dividida em 8 capítulos e um apêndice. Neste Capítulo 1 são apresentados os objetivos a serem alcançados e a justificativa dos mesmos, além do contexto em que a pesquisa está inserida.

O Capítulo 2 é dedicado ao setor carbonífero nacional, em especial da bacia carbonífera catarinense. É apresentado um breve histórico sobre a exploração de carvão, os dados disponíveis sobre os recursos e reservas, bem como as perspectivas sobre o futuro desta atividade. São abordadas sucintamente as atividades de lavra e beneficiamento de minério, tal como ocorrem atualmente. Dedicar-se especial atenção aos rejeitos de beneficiamento de carvão: os processos por meio dos quais eles são gerados, sua origem geológica, características físicas e químicas, o risco de contaminação que oferecem ao meio ambiente, além de seu destino final.

No Capítulo 3 apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre comportamento mecânico de pedregulhos e enrocamentos. Sob este aspecto, ambos os materiais são tratados de maneira semelhante, com diferenças mais quantitativas do que qualitativas. São apresentados os principais fatores que influenciam seu comportamento, no que se refere às características das

partículas e do meio granular e aos tipos e procedimentos de ensaios. Além disso, apresentam-se alguns resultados encontrados da bibliografia consultada.

O Capítulo 4 é dedicado ao desenvolvimento do equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões. São apresentados os aspectos mais relevantes da concepção, projeto, construção e instrumentação. É realizada uma análise de desempenho, a partir dos resultados de um ensaio exploratório.

No Capítulo 5 são abordados os materiais utilizados para a realização da pesquisa. Apresentam-se as minas onde foram coletas amostras, as particularidades de seus processos de beneficiamento e deposição de rejeitos, além dos procedimentos de amostragem.

O Capítulo 6 trata do programa de ensaios. São expostas as metodologias adotadas para realização dos ensaios de campo e de laboratório. Atenção especial é dada aos ensaios de compressão unidimensional e de cisalhamento direto de grandes dimensões. São abordadas também as principais considerações de cálculo.

No Capítulo 7 são apresentados e analisados os resultados dos ensaios realizados. Para os ensaios de compressão unidimensional de grandes dimensões optou-se por apresentar somente os dados principais, deixando os demais para o Apêndice I. São comparados os resultados dos ensaios mecânicos de grandes dimensões com os de pequenas dimensões.

As conclusões são apresentadas no Capítulo 8, juntamente com sugestões para trabalhos futuros.

No Apêndice I são expostos detalhadamente os resultados obtidos nos ensaios de compressão unidimensional de grandes dimensões, para cada estágio de carregamento e descarregamento.



## **CAPÍTULO 2 – A MINERAÇÃO DE CARVÃO NO BRASIL**

### **2.1. INTRODUÇÃO**

#### **2.1.1. Histórico**

Em nível mundial, até o início do século XVIII a utilização do carvão como fonte de energia ocorreu em escala bastante limitada. A partir daí, em decorrência dos avanços tecnológicos, principalmente a invenção da máquina a vapor, por James Watt, a demanda por carvão aumentou significativamente, fazendo com que este combustível se tornasse uma das principais fontes de energia (Encyclopaedia Britannica, 2007).

No Brasil a mineração de carvão teve início na segunda metade do século XIX, no Rio Grande do Sul. Em 1860, em Arroio dos Ratos, começava a exploração brasileira do minério, inicialmente sob controle estatal.

Em Santa Catarina a exploração teve início poucos anos depois, em 1866, com a constituição da empresa Lage & Irmãos. Fato importante foi o início da operação da Estrada de Ferro Donna Thereza Christinna em 1884, ligando as minas ao porto de Laguna (Gothe, 1993).

No início do século XX o consumo brasileiro de carvão ainda era irrisório quando comparado ao mundial, participando com cerca de 0,1%. Nas primeiras décadas desse século, o desenvolvimento do setor carbonífero brasileiro foi bastante afetado pelo aumento do uso de combustíveis derivados de petróleo, mais atraentes economicamente. Porém, a estruturação de empresas como a Companhia Carbonífera Aranguense (CBCA), Companhia Carbonífera Urussanguense (CCU) e a Companhia Próspera S/A foi de grande importância para o aumento da exploração nacional (Gothe, 1993; Milioti, 1999).

Devido à instabilidade do mercado e à necessidade de garantir oferta de minério, o Governo Federal implementou medidas reguladoras de mercado, controlando, por meio de subsídios e intervenções, o consumo e a produção.

Inicialmente produzia-se somente carvão metalúrgico. Com isso desprezava-se grande quantidade de minério de menor qualidade, aumentando a porcentagem de rejeitos. A partir de meados da década de 40, passou-se a produzir também carvão energético, consumido, posteriormente, pela SOLTECA - Sociedade Termelétrica de Capivari, que, implantada na década de 50, atendia o Lavador de Capivari e, mais ao sul, as minas implantadas pela CSN (Companhia Siderúrgica Nacional). Desse modo, houve significativo aumento no

aproveitamento do minério, reduzindo a porcentagem de rejeitos gerados pelo beneficiamento (Gothe, 1993).

Em 1953 o setor carbonífero ganhou novo impulso com a aprovação do Plano Nacional do Carvão. Essencialmente, o plano objetivava ampliar o mercado consumidor por meio da redução de custos ao consumidor final. Para isto, foram oferecidos financiamentos para, por exemplo, o aumento da mecanização das minas, melhoramentos das obras de infra-estrutura de transportes e pesquisas minerais. Nesse período ocorreu grande desenvolvimento nas técnicas de exploração e beneficiamento do minério.

As reformas políticas no Brasil após o Golpe de 1964 acarretaram mudanças econômicas para o setor carbonífero, a saber, a intervenção do Estado nas empresas privadas no sentido de regular a produção e comercialização, fixando quotas e preços, por exemplo (Milioti, 1999).

A década de 70 foi marcada pela Crise do Petróleo. Diante da nova conjuntura internacional o Governo Federal resolveu incentivar o consumo de combustíveis nacionais alternativos, como o álcool e o carvão mineral. Foram criados diversos tipos de carvão energético para uso industrial, cujo consumo foi subsidiado.

Devido principalmente a essas garantias e incentivos estatais o setor carbonífero catarinense apresentou um substancial crescimento nas décadas de 70 e 80. O principal produto comercializado foi o carvão energético, que substituiu em parte o consumo de óleo combustível em diversos setores industriais, como de cimento e cerâmica. Porém, foram as sucessivas ampliações na capacidade do Complexo Térmelétrico Jorge Lacerda as principais responsáveis pelo aumento do consumo de carvão energético. Em 1985, ano de pico na produção nacional, o total anual de carvão bruto (ROM) beneficiado foi de 25 milhões de toneladas, das quais 20 milhões em Santa Catarina (Gothe, 1993).

Nos anos de 1989 e 1990 duas medidas do Governo Federal atingem negativamente a indústria carbonífera nacional: o corte total de subsídios e a desregulamentação do setor, tanto para carvão energético como para metalúrgico, causando decréscimo acentuado na produção. Neste período as siderúrgicas aumentaram significativamente as importações de carvão, reduzindo o consumo de carvão nacional, de menor qualidade (Milioti, 1999).

De 1990 em diante a produção nacional se estabilizou entre 7 e 12 milhões de toneladas anuais de ROM. Atualmente, o principal consumidor são as usinas termelétricas, que utilizam mais de 90% do total produzido (MME, 2005).

A Figura 2.1 apresenta a evolução histórica da produção de carvão bruto no Brasil, desde 1965 até 2004.

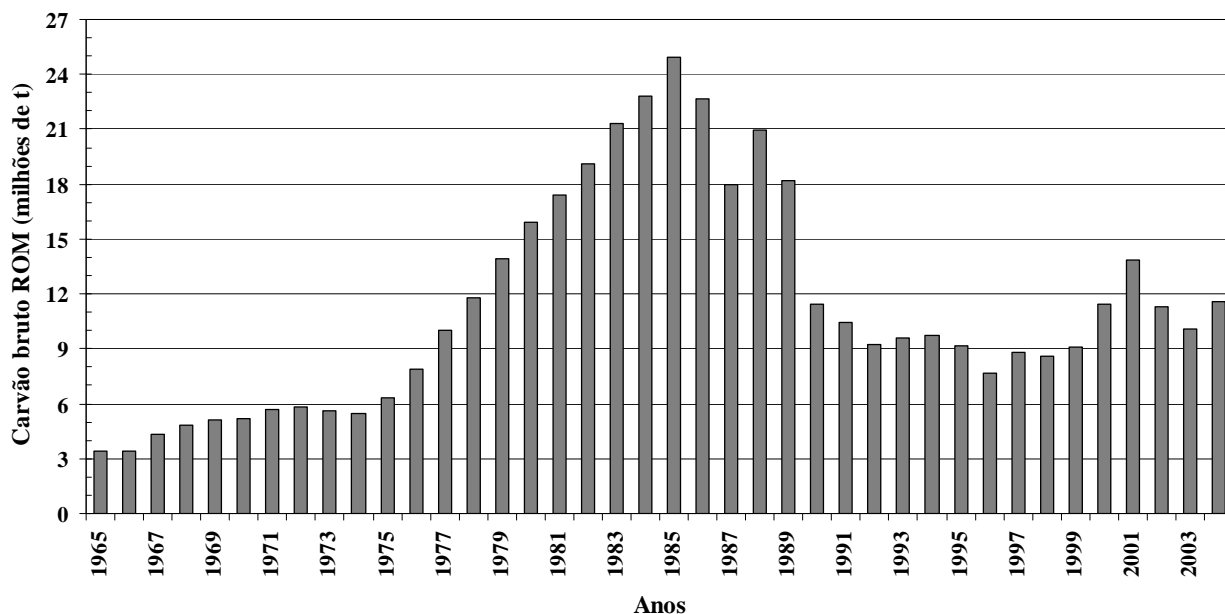


Figura 2.1 - Produção nacional de carvão bruto ROM, de 1965 até 2004

(Fontes: Gothe 1993; Milioti, 1999; DNPM, 2005)

### 2.1.2. Recursos e reservas

Os recursos brasileiros de carvão são encontrados no flanco leste da Bacia do Rio Paraná, numa faixa que vai do Estado do Rio Grande do Sul a São Paulo, em direção sudoeste/nordeste por 1.500km. Pesquisas geológicas indicam a existência de pouco mais de 32 bilhões de toneladas carvão (CPRM, 2000).

Reserva é a parcela identificada de um recurso mineral que atende a critérios mínimos que tornam viável técnica e economicamente sua exploração. Dentre estes critérios estão: qualidade do minério, espessura e profundidade da camada. As reservas podem ser medidas, indicadas ou inferidas. As medidas foram cubadas a partir pesquisas detalhadas, que incluem malhas de furos de sondagem. Reservas indicadas são avaliadas com menor detalhamento, utilizando, por exemplo, estudos geológicos gerais de superfície e eventuais furos de sondagem. Por fim, as inferidas são as estimadas com pequena precisão, que se supõe existir em função da configuração geológica geral (Gothé, 1993).

A Tabela 2.1 apresenta os recursos e reservas brasileiras de carvão.

Tabela 2.1 - Recursos e reservas brasileiras de carvão mineral, em milhões de toneladas (Fonte: CPRM, 2000; DNPM, 2005)

Estado	Reservas <i>in situ</i>			Recursos	Recursos totais
	Medida	Indicada	Inferida		
SP	3,0	1,7	1,3	2,5	8,5
PR	4,6	-	-	98,8	103,4
SC	1.424,8	601,5	217,2	1.105,3	3.348,8
RS	5.280,8	10.100,3	6.317,1	7.099,7	28.797,9
Total	6.713,2	10.703,5	6.535,6	8.306,3	32.258,6

No Estado do Rio Grande do Sul estão cerca de 89% dos recursos nacionais, contra 10% em Santa Catarina. Porém, até hoje as reservas catarinense foram as mais exploradas (Redivo, 2002).

Quando comparados com outros carvões produzidos no mundo, como os do Canadá, Alemanha e Colômbia, por exemplo, pode-se dizer que o carvão brasileiro é de baixa qualidade: ele possui maior quantidade de enxofre e de cinzas e menor de substâncias voláteis. A porcentagem de enxofre decresce do norte para o sul do Brasil, com valores médios em torno de 10% no Estado do Paraná, 3% em Santa Catarina e 0,5% no Rio Grande do Sul (Redivo, 2002).

### 2.1.3. Perspectivas de uso futuro

O carvão mineral é a maior fonte de reservas energéticas não-renováveis do Brasil, representando 46,7% do total. Todavia, apenas 7% da energia consumida provém da queima de carvão (MME, 2005).

Portanto, percebe-se que o setor carbonífero nacional tem grande potencial de crescimento. Apesar da crescente preocupação ambiental com a redução de emissões de gases prejudiciais à atmosfera, dentre os quais estão os oriundos da queima de carvão, nota-se que este minério constitui um recurso energético estratégico do Brasil, ainda não intensamente explorado, e que pode ter um papel importante no desenvolvimento futuro do país.

## 2.2. GEOLOGIA

### 2.2.1. Introdução

Os rejeitos de carvão são constituídos pelos minerais e rochas que ocorrem associados ao carvão, tais como a pirita, arenitos, siltitos e folhelhos (Gothe, 1993). As características físicas, químicas e mecânicas dos rejeitos dependerão dos tipos de materiais encontrados junto às

camadas de carvão, o que, por sua vez, depende da formação geológica das mesmas. A seguir serão apresentadas, sucintamente, as características geológicas das camadas de carvão mais exploradas no Estado de Santa Catarina.

Até o momento, foram identificadas na bacia carbonífera catarinense doze camadas de carvão, todas pertencentes à Formação Rio Bonito, inserida no Grupo Guatá (Redivo, 2002). Das doze camadas, somente em três a lavra é viável economicamente, com as técnicas hoje utilizadas, a saber, nas camadas Barro Branco, Bonito e Irapuá. Atualmente, a camada Irapuá está praticamente exaurida e exploração se concentra nas camadas Barro Branco e Bonito.

Até hoje a camada Barro Branco foi explorada mais intensamente que a Bonito. Um dos motivos é sua localização menos profunda, o que diminui os custos da lavra; o outro, porque possui maior poder calorífico e maior aptidão para produção de carvão metalúrgico. Além disso, a resistência mecânica da camada Barro Branco é maior, o que, aliado a menor profundidade da camada, conduz a pilares de sustentação de teto de menores dimensões. Isto permite extração de maior porcentagem da jazida, isto é, menor quantidade de minério deve ser deixada no subsolo.

### **2.2.2. Geologia geral**

A Formação Rio Bonito é uma das subdivisões do grupo Guatá. Ela foi formada no Permiano Inferior, isto é, entre 270 e 250 milhões de anos atrás. Está ainda dividida em três membros, denominados Siderópolis, Paraguaçu e Triunfo. A Figura 2.2 apresenta estas divisões geológicas.

O Grupo Guatá se caracteriza pela presença de arenitos, siltitos cinza-esverdeados, com intercalações de camadas de carvão e folhelhos carbonosos. A denominação deste grupo foi proposta por Gordon Jr. (1947) para designar as rochas aflorantes nas proximidades da cidade de Guatá-SC. O Grupo Guatá engloba as Formações Palermo e Rio Bonito, descritas por White (1908).

Era	Período	Grupo	Formação	Membro	Litologias
Paleozoico	Permiano Superior 250 - 225 MA	Passa Dois	Irati	Assistencial	Folhelos cinza-escuros a pretos, intercalados com folhelhos pirobetuminosos
				Taquaral	Folhelhos e siltitos cinza-escuros, eventualmente cinza-claros
	Permiano Inferior 270 - 250 MA	Guatá	Palermo	—	Siltitos cinza e cinza esverdeados e arenitos finos, finamente intercalados
			Rio Bonito	Sirerópolis	Arenitos cinza claros, geralmente fino a médios; subordinadamente siltitos e folhelhos cinza escuros; camadas de carvão
				Paraguaçu	Siltitos cinza esverdeados e cinza, subordinadamente, arenitos finos, camadas de carvão perto do topo e da base.
				Triunfo	Arenitos cinza claros de finos a grosseiros; subordinadamente, siltitos cinza escuros, raramente carvão
			Itararé	Rio do Sul	—

Figura 2.2 - Coluna estratigráfica parcial da bacia carbonífera catarinense

(Fontes: CPRM, 2000; Redivo, 2002)

### 2.2.3. Formação Rio Bonito

Medeiros e Thomas (1973) *apud* CPRM (2000) propuseram a divisão da Formação Rio Bonito em três intervalos: inferior, médio e superior. O enquadramento destes na categoria de membros, bem como sua denominação em Triunfo, Paraguaçu e Siderópolis foi realizado por Schneider *et al.* (1974). A Figura 2.3 apresenta o perfil litológico da Formação Rio Bonito.

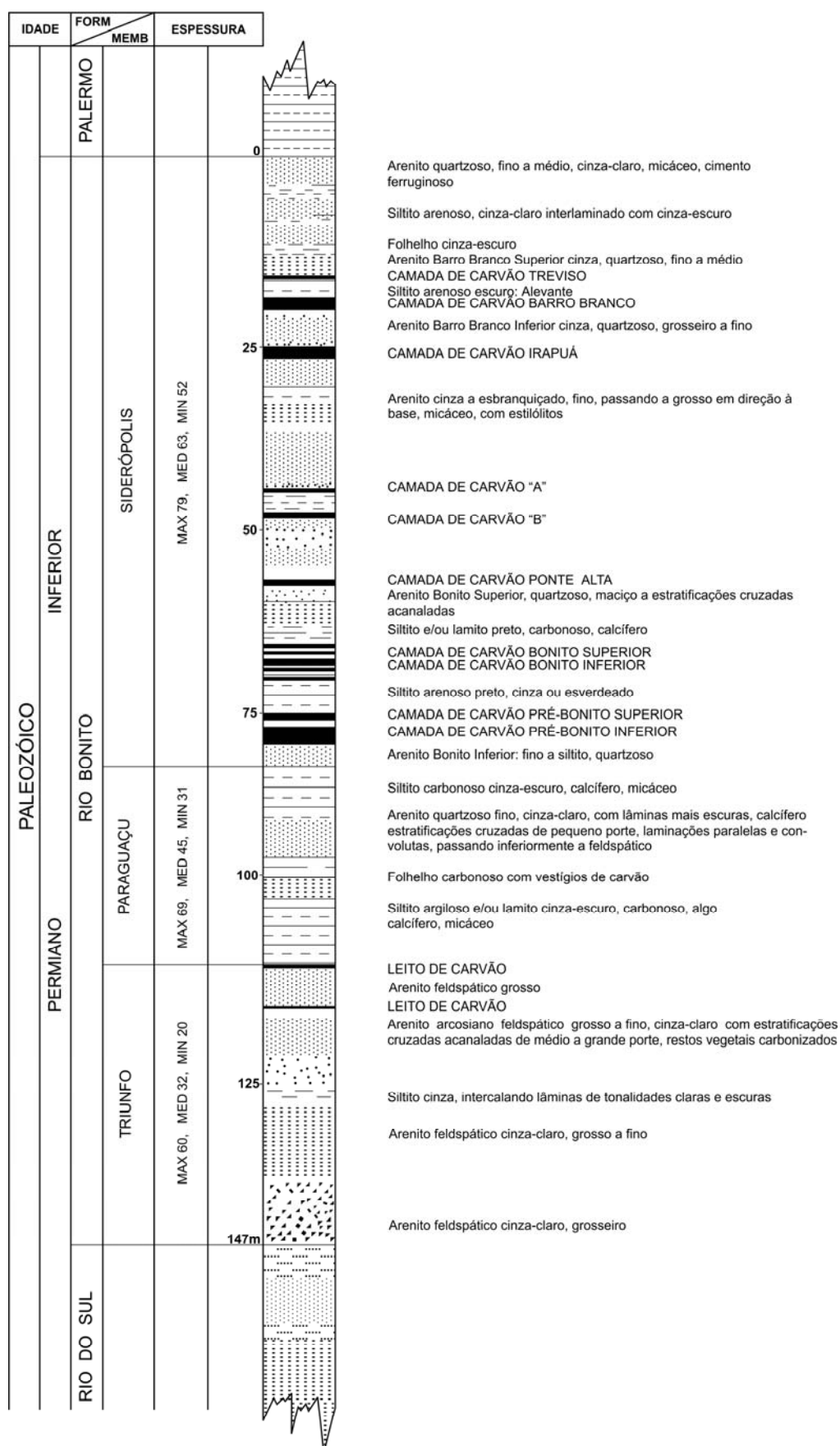


Figura 2.3 - Perfil litológico da Formação Rio Bonito (CPRM, 2000)

### **2.2.3.1. Membro Triunfo**

O Membro Triunfo é constituído principalmente por arenitos e conglomerados cinza-claros a esbranquiçados. Os arenitos variam de finos a grossos, são argilosos, micáceos e feldspáticos; seu grau de selecionamento é regular e geralmente com grãos subarredondados. Apresentam estratificações paralelas, cruzadas tabulares e acnaladas de pequeno e grande porte. A espessura total do membro varia de 20 a 60 metros, com média de 32 metros.

Ocasionalmente, é possível encontrar ainda folhelhos, argilitos e siltitos cinza-escuros a quase pretos, carbonosos, com nódulos de pirita, e, mais raramente, leitos de carvão.

Dadas suas características litológicas e sedimentares, acredita-se que o Membro Triunfo tenha sido formado ambiente flúvio-deltaico. Seus afloramentos são muito restritos, sendo o mais notável localizado na entrada da cidade de Lauro Müller-SC (CPRM, 2000).

### **2.2.3.2. Membro Paraguaçu**

Constituindo a porção intermediária, o Membro Paraguaçu é formado principalmente por siltitos e folhelhos cinza-médio a esverdeados, apresentando secundariamente intercalações de arenitos muito finos e leitos de rochas carbonáticas. Enquanto os siltitos e folhelhos possuem laminação paralela, nos arenitos ela geralmente é cruzada. A espessura total do membro varia de 31 a 69 metros, com média de 45 metros. Sua formação ocorreu em ambiente marinho de plataforma rasa, de caráter transgressivo, sobre os sedimentos flúvio-deltaicos do membro subjacente (CPRM, 2000 e Redivo, 2002).

### **2.2.3.3. Membro Siderópolis**

O Membro Siderópolis, único de importância econômica para mineração de carvão, representa a parte superior da Formação Rio Bonito. É formado principalmente por arenitos, com intercalações de siltitos, argilitos e folhelhos carbonosos, apresentando diversos leitos de carvão. A espessura total varia de 52 a 79 metros, com média de 63 metros (CPRM, 2000).

Os arenitos possuem granulometria fina a muito fina, normalmente coloração cinza-claro a cinza-médio e laminação paralela e ondulada, por vezes associada à estratificação cruzada. Localmente, podem ser médios a grosseiros, com estratificação cruzada e grãos angulosos a subangulosos (CPRM, 2000).

Os siltitos possuem coloração cinza-médio a cinza-escuro, estando associados aos arenitos finos. Ocorrem também siltitos cinza escuros a pretos, carbonosos, geralmente maciços, frequentemente conjugados a camadas de carvão (CPRM, 2000).

Das doze camadas de carvão até hoje identificadas, dez ocorrem no Membro Siderópolis.



Na metade inferior encontram-se: Pré-Bonito Inferior, Pré-Bonito Superior, Bonito Inferior, Bonito Superior, Ponte Alta, “A” e “B”, na seqüência da base para o topo. Usualmente a camada Bonito Inferior é chamada somente de camada Bonito, denominação esta doravante aqui adotada. Na metade superior do Membro Siderópolis estão as camadas Irapuá, Barro Branco e Treviso (CPRM, 2000).

As camadas Bonito e Barro Branco são constituídas por horizontes de formato tabular com grande extensão lateral. O mesmo não ocorre com a camada Irapuá, que foi depositada na forma de lentes e, por isso, tem extensão limitada. Estas três camadas foram até hoje as únicas exploradas em grande escala (Redivo, 2002).

Aboarrage e Lopes (1986) *apud* CPRM (2000) pesquisaram os recursos catarinenses de carvão dividindo-os em tipos de camadas e espessura da cobertura, isto é, a profundidade de sua ocorrência. A Tabela 2.2 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 2.2 - Recursos catarinenses de carvão, por camada, em milhões de toneladas (CPRM, 2000)

Camadas	Cobertura (metros)				Total
	< 50	50 a 300	300 a 800	> 800	
Barro Branco	196,6	710,0	292,3	124,4	1.323,3
A	-	-	106,1	61,0	167,1
Ponte Alta	-	-	183,5	357,6	541,1
Bonito Superior	4,0	41,7	250,1	-	295,8
Bonito Inferior	344,7	605,7	354,7	242,3	1.547,4
Pré-Bonito Superior	-	34,7	181,3	-	216,0
Pré-Bonito Inferior	-	-	197,8	-	197,8
Total	545,3	1.392,1	1.565,8	785,3	4.288,5

Nota-se que as camadas Barro Branco e Bonito Inferior são as que contêm as maiores quantidades de carvão, com valores bem mais expressivos que as demais. A Tabela 2.3 apresenta a participação relativa destas camadas para cada faixa de espessura de cobertura.

Tabela 2.3 - Participação das camadas Barro Branco e Bonito Inferior nos recursos de carvão

Camadas		Cobertura (metros)			
		< 50	50 a 300	300 a 800	> 800
Barro Branco	(%)	36	51	19	16
Bonito Inferior	(%)	63	43	23	31
Total	(%)	99	94	42	47

É importante notar que, para as menores profundidades, situação em que a lavra é mais econômica, as duas camadas respondem pela quase totalidade dos recursos. Considerando o total dos recursos, as duas camadas juntas representam 67%, com 31% para a Barro Branco e 36% para a Bonito.

#### *Camada de carvão Barro Branco*

A ocorrência da camada Barro Branco atinge área de aproximadamente 2000km<sup>2</sup>, estando presente em praticamente toda a bacia carbonífera catarinense. Ela é constituída principalmente por leitos de carvão intercalados por siltitos e folhelhos carbonosos. Em média, as espessuras da camada total e de carvão contido são de, respectivamente, 2,0 e 1,0 metros, sendo que esta última pode atingir até 1,6 metros ao longo do eixo da bacia (Redivo, 2002).

A gênese desta camada tem sido correlacionada a um ambiente favorável à proliferação de uma vegetação pantanosa, provavelmente em paleo-relevo de caráter lagunar e/ou meandros abandonados, onde o desenvolvimento vegetal ocorreu preferencialmente nas margens menos profundas destas áreas, o que justificaria a sinuosidade e aparente variabilidade dos depósitos (Redivo, 2002).

Os leitos de carvão, siltitos e folhelhos apresentam a uma razoável uniformidade, o que permite dividir a camada, da base para o topo, em Banco, Silito Barro Branco, Coringa, Quadração e Forro (CPRM, 2000).

Segundo Teichmüller (1982) *apud* Redivo (2002) o carvão obtido da camada Barro Branco é classificado como betuminoso de alto volátil A, com alto teor de pirita. Em comparação com o carvão Bonito, o Barro Branco permite maior recuperação de carvão metalúrgico, utilizado em siderúrgicas.

#### *Camada de carvão Bonito*

A camada Bonito, ou Bonito Inferior, possui menor área de ocorrência do que a camada Barro Branco, porém maior espessura de camada total, podendo atingir até 3,0 metros na porção norte da bacia, região de Lauro Müller e Treviso-SC. É composta por numerosos leitos de carvão

fosco intercalados por finas camadas de siltitos e folhelhos, geralmente carbonosos. A fração carvão está entre 60% e 80% (CPRM, 2000).

A camada Bonito Superior, de menor espessura e importância econômica, situa-se até 15 metros acima da Bonito Inferior e está mais desenvolvida na porção sul da bacia carbonífera, entre os municípios de Içara e Araranguá-SC. Geralmente é constituída por um único leito de carvão, mas pode estar associada a camadas delgadas de siltitos e folhelhos carbonosos.

As camadas Bonito Inferior e Superior estão normalmente separadas pelo arenito Bonito, cuja espessura varia de 0 a 15 metros. Este possui granulação fina, coloração cinza esbranquiçado, com estratificação cruzada acanalada e com frequência é piritoso. Na sua base e/ou topo encontra-se raramente siltitos e/ou siltitos carbonosos. Em alguns locais próximos ao mar o arenito Bonito pode desaparecer inteiramente, fazendo com que ocorra a união das camadas Bonito Superior e Inferior (Redivo, 2002).

Segundo Süffart *et al.* (1977) *apud* Redivo (2002), tanto a camada Bonito Inferior com a Superior origina-se de depósitos de mangue, formados após uma regressão marinha, estendendo-se de forma descontínua, desde o rio Capivara, ao norte de município de Lauro Müller-SC, até as proximidades de Torres-RS.

As características da camada Bonito Inferior permitem a recuperação tanto de carvão energético como de metalúrgico. Porém, o rendimento deste último é menor quando comparado à camada Barro Branco. Isto contribuiu para que no passado a camada Bonito não fosse lavrada em grande escala, visto que grande parte da produção catarinense tinha como destino a siderurgia (Redivo, 2002). Segundo Zingano (2002), a resistência à compressão simples da camada Bonito varia entre 20 e 30MPa, em média, enquanto para os argilitos e siltitos a ela associados variam de 15 a 25MPa e de 30 a 40MPa, respectivamente.

## **2.3. ASPECTOS TÉCNICOS DA MINERAÇÃO**

### **2.3.1. Introdução**

As principais atividades envolvidas no processo de obtenção de carvão em Santa Catarina são: lavra ou extração, beneficiamento e deposição de rejeitos.

Os métodos empregados na obtenção do carvão catarinense são distintos dos utilizados em países como Alemanha, Canadá e Colômbia. Em Santa Catarina, o carvão bruto, extraído da jazida, necessita passar por processo de beneficiamento, onde é purificado, para poder ser comercializado. Já nos países supracitados, o carvão extraído já possui características adequadas para uso, não havendo necessidade de beneficiamento (Redivo, 2002).

### 2.3.2. Lavra

A lavra consiste num conjunto de operações cujo objetivo é a extração do minério do local onde ele se encontra na natureza. Existem dois tipos principais de lavra: céu-aberto e subterrânea.

#### 2.3.2.1. Lavra a céu-aberto

A lavra a céu-aberto é praticada quando a camada de carvão se encontra a pouca profundidade, em geral até 20 metros, a depender dos custos envolvidos. Consiste basicamente em: a) remoção do material de cobertura, composto por solos e/ou rochas, denominado estéril, que é depositado nas adjacências e b) desmonte da camada e transporte do carvão bruto (ROM).

É comum a utilização de equipamentos de grande porte, do tipo *dragline* ou *shovell*, por exemplo, para retirada da cobertura. Em Santa Catarina, entre as décadas de 70 e 80, a Companhia Siderúrgica Nacional e a Carbonífera Treviso S/A mineraram extensas áreas a céu-aberto utilizando uma *dragline* Marion, que chegava a atingir produtividade de 900m<sup>3</sup>/hora (Bortot, 2000).

E geral, a exploração ocorre numa seqüência de cortes, na qual o estéril do corte em atividade, seja ele solo ou rocha, é depositado na cava deixada pelo corte anterior. Esse processo acarreta o que comumente é denominado “inversão de solo”, já que o solo, que é removido primeiro, fica sotoposto à rocha, escavada por último. Perfis deste tipo são comuns em municípios como Siderópolis e Lauro Müller-SC.

Atualmente, são pequenas as reservas catarinenses passíveis de serem mineradas a céu-aberto. Todavia, este tipo de lavra ainda é praticado em pequena escala.

#### 2.3.2.2. Lavra subterrânea

Quando a camada de carvão se encontra em profundidades maiores que 20 metros, a lavra subterrânea tende a ser mais econômica. É necessária a abertura de túneis e/ou poços verticais de acesso, por meio dos quais o carvão bruto é transportado para a superfície.

A exploração pode ser feita utilizando dois métodos: *long-wall* ou câmara e pilares, sendo que neste último os pilares podem ou não serem recuperados. O primeiro método não é mais utilizado em Santa Catarina, devido principalmente à problemas de subsidência associados, isto é, ruptura do maciço rochoso acima da camada de carvão e rebaixamento irregular da superfície do terreno, causando danos em edificações e ao meio ambiente. Também por este motivo, a recuperação de pilares não é mais permitida desde o início da década de 90. Portanto, o método de câmaras e pilares, sem recuperação de pilares, é o único praticado atualmente.

O processo de exploração ocorre do seguinte modo: uma vez atingida a camada de carvão, é aberto um eixo principal de transporte, que pode ser constituído de uma ou mais galerias paralelas, e, perpendicularmente a este, são traçados painéis de produção. Entre as galerias são deixados pilares, que consistem em frações não mineradas da camada, cujo objetivo é dar sustentação ao “teto”, impedindo ocorrência de subsidência. As dimensões dos pilares dependem da profundidade da camada, isto é, do esforço exercido pelo maciço rochoso acima, e da resistência mecânica do material constituinte da mesma, variando de  $6\text{m} \times 6\text{m}$  até  $16\text{m} \times 16\text{m}$ .

As diversas atividades envolvidas na lavra, como perfuração, carregamento e transporte, podem ser feitas manualmente ou utilizando máquinas, admitindo vários graus de mecanização. Geralmente, o desmonte da camada é feito utilizando explosivos. Porém, também é possível fazê-lo por meio de máquinas do tipo "minerador contínuo" (*continious miner*). Após o desmonte, o carvão bruto (ROM) é transportado para a superfície, onde é beneficiado.

### 2.3.3. Beneficiamento

Processos de beneficiamento de carvão são empregados sempre que o minério saído-da-mina (*run-of-mine*, ou ROM) não possui as propriedades necessárias para o uso a que se destina, necessitando, portanto, de purificação. No caso da utilização na UTE Jorge Lacerda, o carvão vendável deve possuir, atualmente, poder calorífero em torno de 4500 kcal/kg, além de outras características, como teor máximo de enxofre (Redivo, 2002). O beneficiamento objetiva separar o carvão propriamente dito dos demais minerais que se encontram a ele associados, considerados impurezas e denominados rejeitos.

Os rejeitos são constituídos predominantemente por siltitos, argilitos e folhelhos, além de pirita ( $\text{FeS}_2$ ), podendo ser classificados em finos ou grossos. Em geral, os finos possuem partículas menores que 0,65mm e representam cerca de 10% do total de rejeitos, em massa. Os grossos, que representam os 90% restantes, possuem a grande maioria de suas partículas maiores que 0,65mm, embora entre 5 e 15% sejam menores. Atualmente, tanto rejeitos finos como grossos não têm valor econômico. São encaminhados para depósitos, na forma de aterros.

Os tipos de equipamentos utilizados na separação, sua regulagem e os processos empregados dependem das propriedades do ROM e das características desejadas para o produto final. Portanto, as propriedades físicas e mecânicas dos rejeitos também dependem dos processos de beneficiamento adotados.

Em geral, o beneficiamento de ROM atualmente utilizado nas minas catarinenses é composto pelas seguintes etapas principais:

1º - Pré-tratamento:

- Britagem do ROM (redução do tamanho das partículas);
- Peneiramento e classificação (com encaminhamento para rebritagem, se necessário).

2º - Beneficiamento da fração grossa ( $\phi > 0,65\text{mm}$ ):

- Jigagem (realizada em “lavador”, com retenção dos finos).

3º - Beneficiamento da fração fina ( $\phi < 0,65\text{mm}$ ):

- Ciclones, mesas vibratórias e flotadores.

As Figuras 2.4 e 2.5 apresentam um pátio de beneficiamento típico. As principais etapas estão indicadas.



Figura 2.4 - Pátio de beneficiamento da Mina do Verdinho, de propriedade da Carbonífera Criciúma S/A, localizada em Forquilha-SC.

Os números da Figura 2.4 indicam: 1) acesso ao subsolo e transporte do ROM, 2) classificação, britagem e peneiramento e 3) pilha de ROM britado.



Figura 2.5 - Lavador de Mina do Verdinho, Forquilha-SC.

Os números da Figura 5.5 indicam: 1) entrada de ROM britado, 2) lavador provido de ciclones e mesas concentradoras, 3) saída de rejeitos (silos) e 4) saída de carvão vendável.

A britagem é a etapa determinante na distribuição granulométrica dos rejeitos. Quanto mais fina a granulometria do ROM, maior a porcentagem de carvão recuperado. Porém, maiores são os custos de beneficiamento. A determinação da intensidade da britagem é feita comparando-se os custos dos equipamentos, sua manutenção e operação com as respectivas porcentagens de carvão recuperado.

São utilizados britadores de mandíbulas, cônicos, de impacto, de martelos e/ou de rolos dentados. O ROM pode passar em um ou dois britadores, dependendo de características como granulometria e resistência das partículas. É usual o emprego um britador para o ROM Bonito e dois para o ROM Barro Branco, já que este último possui maior resistência mecânica.

Após peneiramento e classificação, o britado é encaminhado para jigues, também chamados de lavadores, onde o carvão é separado do rejeito por diferença de densidade. O britado é depositado sobre um leito sujeito a movimentos pulsantes, proporcionado por mesas horizontais acionadas por pistões verticais. Água corrente passa pelo leito. A pulsação causa segregação do material, ficando as partículas de maior densidade (rejeitos) abaixo daquelas com menor densidade (carvão). Estas últimas são encaminhadas para fora do jigue pelo fluxo d'água.



À jusante existem peneiras que retêm as partículas de carvão maiores que 0,65mm. A água carreando partículas menores é encaminhada para ciclones, mesas concentradoras e flotadores, responsáveis pela retirada do minério. Os rejeitos separados nos jigues são chamados grossos. Os demais são denominados finos. Existem ainda rejeitos ultra-finos, decantados lentamente em lagoas ou retirados de suspensão em espessadores de lamelas, por exemplo.

#### 2.3.4. Deposição de rejeitos

Os rejeitos contêm em sua estrutura, entre outras substâncias, pirita ( $\text{FeS}_2$ ) e metais pesados, tais como alumínio, ferro, manganês, níquel, cobre e zinco. Elevadas concentrações destas substâncias são prejudiciais ao meio ambiente. Portanto, é necessário isolar os rejeitos. Isto é obtido conduzindo-os para depósitos controlados, na forma de aterros, dotados de impermeabilizações de base e de cobertura. A Figura 2.6 apresenta um depósito em operação.



Figura 2.6 - Espalhamento de rejeito em depósito. Mina Bonito, de propriedade da Carbonífera Catarinense Ltda., localizada em Lauro Müller-SC

Do pátio de beneficiamento, isto é, dos silos localizados junto ao lavador, os rejeitos são transportados para esses depósitos, geralmente por caminhões basculantes. Ali são espalhados com tratores de esteira em camadas de 30 a 60cm, como indicado na Figura 2.6. Geralmente não são empregados rolos compactadores para densificação do material; somente os tratores e os caminhões auxiliam na compactação. Não é comum a divisão dos depósitos em setores isolados



uns dos outros. Esta divisão reduziria o tempo de exposição dos rejeitos às intempéries e sua lixiviação pelas águas das chuvas, causadas da oxidação da pirita e carreamento de poluentes.

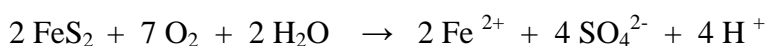
## 2.4. POLUIÇÃO CAUSADA PELOS REJEITOS

### 2.4.1. Oxidação da pirita

Os principais problemas associados aos rejeitos são a geração de drenagem ácida e a liberação de metais pesados, decorrentes, direta ou indiretamente, da presença de elevadas concentrações de pirita ( $\text{FeS}_2$ ). Esta se oxida facilmente quando em contato com água e oxigênio, gerando ácido sulfúrico, que, por sua vez, dissolve os metais pesados associados ao mineral, permitindo sua ocorrência em altas concentrações nas águas superficiais e sub-superficiais.

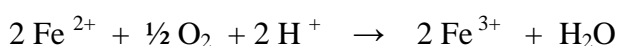
Resumidamente, o processo pode ser descrito da seguinte forma (Ortiz e Teixeira, 2002; Spinelli Pinto e Kampf, 2002):

1° - A pirita é oxidada e dissociada quando exposta ao ar e à água.

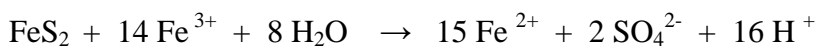


Ocorre liberação de acidez e os íons  $\text{Fe}^{2+}$  podem ser oxidados ou precipitados na forma de hidróxidos ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ).

2° - Quando o pH atinge valores menores que 4,0, parte dos íons  $\text{Fe}^{2+}$  são oxidados em íons  $\text{Fe}^{3+}$ . Neste caso o agente catalisador é a bactéria *Thiobacillus ferrooxidans*.



3° - A pirita é então oxidada pelo  $\text{Fe}^{3+}$ . Estas reações são de alta velocidade e necessitam de pH menor que 4,0 para ocorrerem.



Novas quantidades de ácido sulfúrico são produzidas, aumentando ainda mais a acidez do meio. Com baixo pH as reações ocorrem com maior rapidez.

Existem ainda outras reações secundárias. O baixo pH do meio afeta a estabilidade dos alumino-silicatos que presentes nos rejeitos, resultando na sua dissociação e na liberação e solubilização de metais pesados, como alumínio (Al), ferro (Fe), manganês (Mn), níquel (Ni), cobre (Cu) e zinco (Zn). Além disso, podem ser formados sulfatos de Fe (II), de Al, de Al e K, de Fe (III) e K (Spinelli Pinto e Kampf, 2002).

O enxofre (S) contido nos rejeitos ocorre sob três diferentes formas: a) enxofre inorgânico, encontrado principalmente na forma de pirita ( $\text{FeS}_2$ ), b) enxofre sulfático, proveniente da decomposição das piritas, e c) enxofre orgânico, presente na forma de tiofenos, tioéteres e mercaptanos (Redivo, 2002).

Dos três tipos de enxofre, o inorgânico e o sulfático são os principais responsáveis pela formação de drenagem ácida. Visto que o segundo é proveniente da oxidação do primeiro, pode-se dizer que este, o enxofre inorgânico, é, em última instância, o causador da acidez. A Tabela 2.4 apresenta concentrações de enxofre típicas para rejeitos grossos de algumas minas catarinenses. Os rejeitos estão divididos em frações  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  (ver item 2.6.1).

Tabela 2.4 - Teores de enxofre de rejeitos Barro Branco e Bonito (Fonte: Indústria Carbonífera Rio Deserto Ltda, 2005)

Enxofre		Mina do Trevo			Carbonífera Criciúma			Cooperminas		Mina do Barro Branco	
		$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_1$	$R_2$	$R_1$	$R_2$
Inorgânico	%	3,1	2,0	1,0	2,1	2,2	3,0	5,2	4,9	5,0	2,6
Sulfático	%	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,7	0,2	0,7	0,6
Orgânico	%	4,1	1,1	1,1	5,4	2,4	4,0	5,5	0,5	6,2	3,3
Inorgânico + Sulfático	%	3,1	2,0	1,0	2,2	2,4	3,1	5,9	5,0	5,7	3,1
Total	%	7,2	3,1	2,1	7,5	4,8	7,0	11,5	5,5	11,9	6,4

#### 2.4.2. Isolamento dos rejeitos

Caso os depósitos não forem devidamente projetados, executados e controlados, as águas das chuvas poderão lixiviar os rejeitos contendo pirita oxidada, gerando drenagem ácida com elevadas concentrações de metais pesados, que poderá desaguar em cursos d'água próximos ou atingir o lençol freático. Além disso, poderá ocorrer emissão de gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) para a atmosfera, prejudicando a saúde humana e causando chuva ácida. A Figura 2.7 apresenta um depósito de rejeitos antigo, construído sem nenhum controle.



Figura 2.7 - Setor antigo e sem controle do depósito de rejeitos da Mina Cooperminas, em Forquilha-SC (em dezembro de 2005)

À direita da Figura 2.7 pode-se observar a existência de um pequeno córrego, passando ao lado do depósito. Suas águas possuem baixíssimo pH (menor que 3,0) e elevadas concentrações de metais pesados.

No passado recente era prática corrente fazer a deposição de rejeitos sem controle de impermeabilização, drenagem e tratamento de efluentes. Por isso, os problemas supracitados podem ser observados em inúmeras áreas da bacia carbonífera catarinense. Ainda hoje existem diversos depósitos antigos abandonados que continuam a poluir a região.

A preocupação com os problemas ambientais decorrentes da deposição inadequada de rejeitos não é recente. No início da década de 80 foi elaborado o projeto ZETA-IESA para recuperação de áreas degradadas por rejeitos de carvão, que estabeleceu critérios para construção e operação desses depósitos, e cuja concepção era isolar o material do meio externo por meio da utilização de camadas de solo argiloso compactado. A baixa permeabilidade deste último minimizaria a entrada água e ar, reduzindo a oxidação da pirita. O bloqueio da entrada de águas das chuvas impediria a lixiviação do material. Os efluentes do interior dos depósitos seriam coletados e tratados antes de serem descartados na drenagem superficial natural. Todavia, estas diretrizes demoraram vários anos para serem aplicadas, contribuindo para o aumento da poluição dos recursos hídricos da região.

A Figura 2.8 mostra uma área degradada, situada nas proximidades da localidade de Vila Fiorita, município de Siderópolis-SC. Ali ocorreu lavra a céu-aberto e subterrânea e deposição descontrolada de rejeitos grossos e finos, além de ultra-finos de lagoas de decantação. Também foram instaladas lagoas de decantação de água utilizada nos jigues.



Figura 2.8 - Ortofoto-carta de área próxima às localidades de Vila Fiorita e Vila Funil, município de Siderópolis-SC (DNPM, 2002).

Os números da Figura 2.8 indicam: 1) antiga lavra a céu-aberto, entre as décadas de 70 e 80, 2) antiga lavra de subsolo, 3) pátio de beneficiamento em operação, 4) lagoas de decantação abandonadas e em operação, 5) depósito de rejeito abandonado sem controle, 6) córrego poluído por drenagem ácida de mina e de rejeitos (deságua na Língua do Dragão) e 7) rio Mãe Luzia poluído.

Atualmente, exige-se que os rejeitos sejam encaminhados para depósitos controlados, dotados de sistema de isolamento, drenagem interna e externa e tratamento de efluentes, nos moldes do projeto ZETA-IESA. Estes depósitos localizam-se, geralmente, nas imediações do pátio de beneficiamento, minimizando custos de transporte. Uma vez depositados, os rejeitos ali



permanecem indefinidamente. A Figura 2.9 mostra um depósito em operação, no final de sua vida útil.



Figura 2.9 - Depósito da Mina Esperança, de propriedade da Carbonífera Metropolitana S/A, em Treviso-SC

Como já citado, geralmente os rejeitos são espalhados por meio de tratores de esteira, em camadas de 30 a 60 centímetros. Em algumas minas ainda é praticada a “ponta de aterro”, o que não é recomendado por resultar em baixa densidade relativa do material. Em geral, a compactação é bastante precária, sem utilização de rolos compactadores. Os tratores de esteira e os caminhões basculante são operados para também auxiliar a compactação. Controles tecnológicos de campo também são pouco comuns. O resultado disso é a baixa densidade relativa, o que aumenta a compressibilidade e diminui a resistência.

## **2.5. DEPÓSITOS DE REJEITO**

### **2.5.1. Introdução**

Os depósitos têm como principal objetivo evitar que os rejeitos causem os danos ambientais acima mencionados. Desde o início da década de 80 já havia preocupações com a poluição causada pelos rejeitos e surgiram tentativas de estabelecer critérios de deposição e acondicionamento, notadamente o projeto ZATA-IESA (1983). Todavia, muitos anos se passaram até que medidas eficientes fossem adotadas para reduzir os danos.

Atualmente, os órgãos ambientais fiscalizadores exigem para o licenciamento que os



instalados.

Uma estação de tratamento recebe os efluentes captados pela drenagem interna, neutraliza o pH, retêm os metais pesados e descarta água contendo concentrações legalmente aceitáveis de substâncias poluentes.

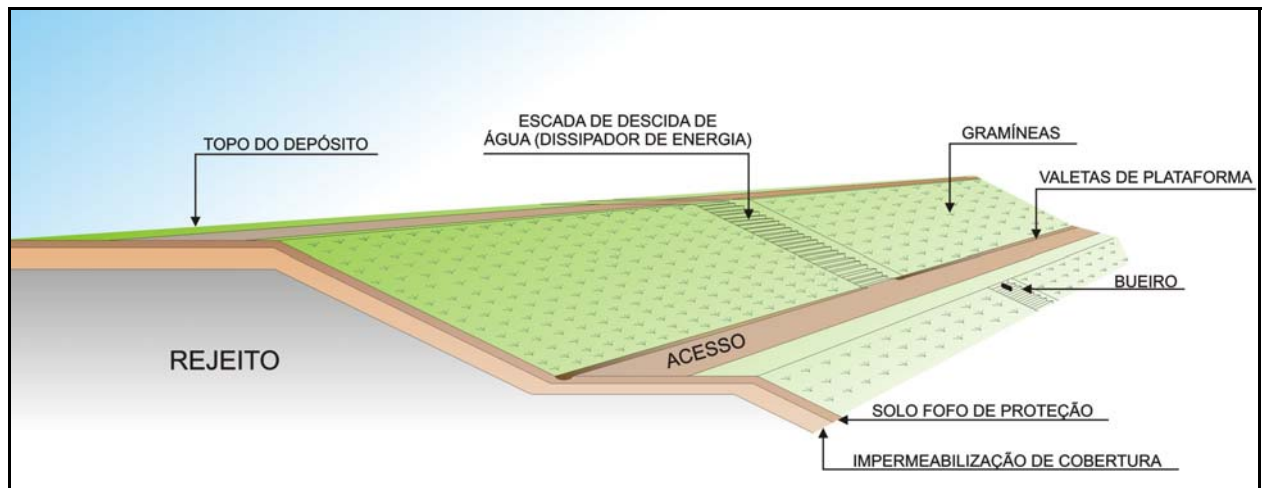


Figura 2.11 - Topo de depósito revegetado a com drenagem externa

### 2.5.2. Análises geomecânicas

Em geral, a inexistência ou pouca confiabilidade de parâmetros de compressibilidade e resistência de rejeitos resulta em projetos pouco detalhados do ponto de vista geomecânico, isto é, no que se refere a análises de estabilidade de taludes e previsão de recalques. Um dos obstáculos para a realização de ensaios geotécnicos é a necessidade de equipamentos de grandes dimensões, em virtude das elevadas dimensões das partículas constituintes dos rejeitos. Todavia, o descaso de empresas proprietárias de minas e de órgãos fiscalizadores e o desconhecimento da necessidade dessas análises também são fatores importantes.

Em projetos e construções de depósitos costuma-se adotar critérios e técnicas empíricos, isto é, correntemente utilizados e com resultados julgados satisfatórios, mas cujo embasamento científico é precário. Além disso, é praticamente inexistente a instalação de instrumentos de monitoramento de campo, tais como placas de recalques e inclinômetros, o que impede a realização de análises de desempenho durante e após a construção.

Deve-se salientar que deformações excessivas dos depósitos, causadas por recalques e/ou rupturas de taludes, podem causar graves problemas nos sistemas de isolamento e de drenagem, dentre os quais estão: a) surgimento de fissuras nas camadas impermeabilizantes, permitindo a entrada de águas das chuvas e/ou a saída de efluentes, b) ruptura de drenos da drenagem interna,

ocasionando acúmulo de efluentes sobre camadas impermeabilizantes, do que se segue infiltração dos mesmos para o solo de fundação devido ao aumento do gradiente hidráulico.

As camadas impermeabilizantes podem ser bastante susceptíveis à rupturas decorrentes de recalques diferenciais, devido a sua pequena espessura. Segundo Qian *et al.* (2002) valores de distorção angular  $\psi$  inferiores a 0,1% já podem causar trincas de tração.  $\psi$  é dado por:

$$\psi = \frac{\Delta h}{\Delta L} \times 100 \quad (2.1)$$

onde  $\Delta h$  é a distância vertical entre dois pontos após a ocorrência do recalque e  $\Delta L$  é a distância horizontal entre eles, conforme indica a Figura 2.12.

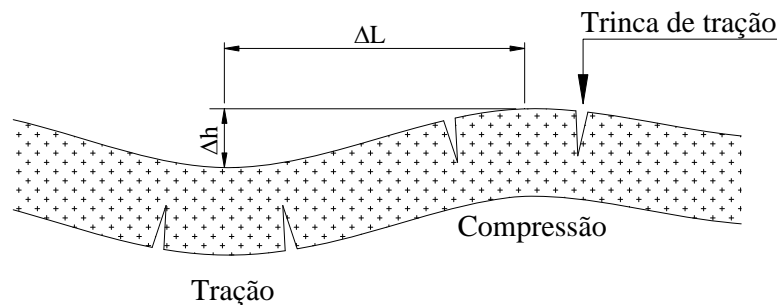


Figura 2.12 - Ocorrência de trincas de tração devido a recalques diferenciais (modificado de Qian *et al.*, 2002)

## 2.6. REJEITOS DE BENEFICIAMENTO

Como já citado, os rejeitos são constituídos por rochas e minerais associados aos leitos carvão, tais como siltitos, folhelhos e pirita. Podem ser classificados seguindo dois critérios: a) camada de carvão lavrada e b) tamanho de partículas. Segundo a camada lavrada, eles se dividem em rejeito Barro Branco e rejeito Bonito. Granulometricamente, temos rejeitos finos, com partículas menores que 0,65 mm, e grossos, com mais de 80% da massa composta por partículas maiores que 0,65 mm.

A porcentagem de rejeitos gerados em relação ao carvão bruto é função principalmente das propriedades deste e dos produtos que se deseja obter. A Tabela 2.5 apresenta a proporção média de rejeitos, grossos mais finos, para lavra subterrânea em Santa Catarina.



Tabela 2.5 - Porcentagem de rejeito em relação ao carvão bruto (Redivo, 2002)

Rejeito	% em relação ao ROM
Barro Branco	57 a 65
Bonito	46 a 52

Os rejeitos finos representam entre 7 e 10% do total de rejeitos gerados, sendo o restante grossos.

### 2.6.1. Caracterização dos rejeitos grossos

As operações nos jigues acarretam a separação dos rejeitos grossos em duas ou três frações, a depender da camada de carvão explorada e das particularidades do beneficiamento. No caso de ROM Barro Branco geralmente existem três frações, denominadas  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$ , embora, em alguns casos, existam somente duas:  $R_1$  e  $R_2$ . Já para ROM Bonito, é usual existirem duas frações:  $R_1$  e  $R_2$ . A Figura 2.13 apresenta rejeitos Barro Banco  $R_1$  e  $R_2$  misturados.



Figura 2.13 - Rejeitos grossos Barro Banco  $R_1$  e  $R_2$  da Mina Cooperminas, localizada em Forquilha-SC

Ao saírem dos jigues, as diferentes frações podem ser encaminhadas para silos individuais ou misturadas num mesmo silo. Dos silos os rejeitos são encaminhados para depósitos.

### *Distribuição granulométrica*

A fração  $R_1$  possui partículas com diâmetro máximo maior que as demais frações. A  $R_3$  é a fração mais fina, enquanto a  $R_2$  é intermediária. A Figura 2.14 apresenta curvas granulométricas típicas para rejeitos da camada Barro Branco.

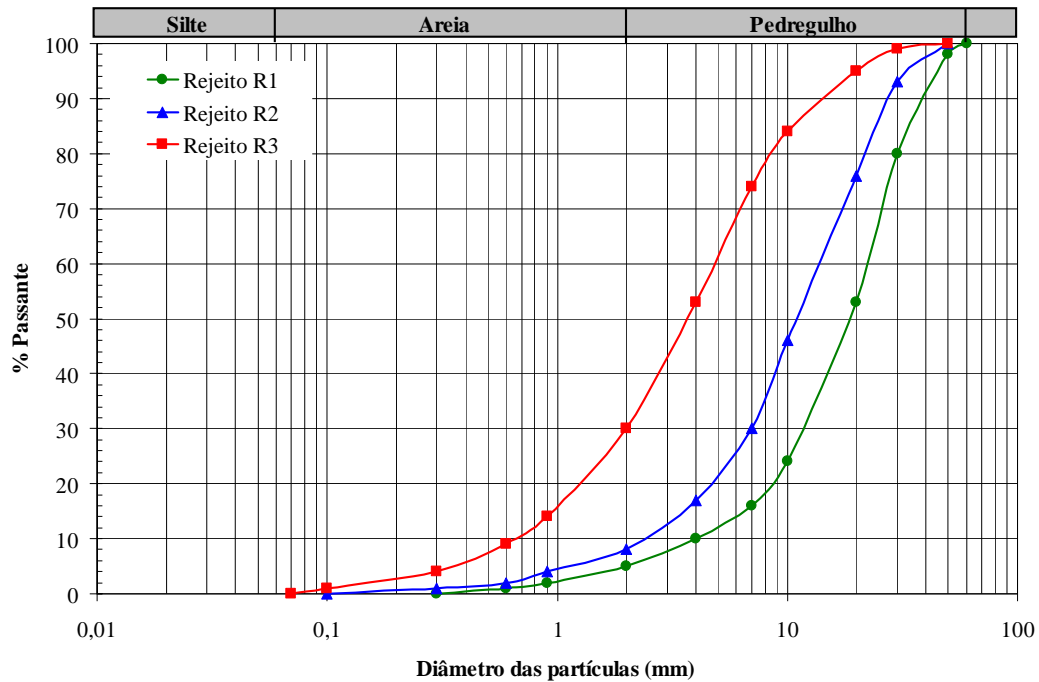


Figura 2.14 - Curvas granulométricas típicas de frações  $R_1$ ,  $R_2$  e  $R_3$  para rejeitos Barro Branco (ZETA-IESA, 1983)

### *Teor de umidade*

Ao saírem dos silos as partículas estão totalmente cobertas por película de água. Sua umidade corresponde à máxima quantidade de água que elas conseguem reter. O excesso escorre pelo fundo do silo ou do caminhão basculante durante o transporte até o depósito. Em geral, o teor de umidade varia entre 5 e 10% (ZETA-IESA, 1983).

### *Massa específica das partículas*

Em geral, as partículas que compõem os rejeitos  $R_1$  possuem densidade maior do que as encontradas nas demais frações. Isso ocorre devido à maior concentração de pirita, o que torna esta fração potencialmente mais poluidora. A fração  $R_3$ , quando existe, é aquela com menor porcentagem de pirita. A  $R_2$  ocupa posição intermediária. A Tabela 2.6 apresenta valores típicos de massa específica das partículas para rejeitos oriundos da camada Barro Branco.

Tabela 2.6 - Massa específica das partículas de rejeito Barro Branco (ZETA-IESA, 1983)

	Fração		
	R1	R2	R3
Massa específica das partículas (g/cm <sup>3</sup> )	2,64	2,40	2,23

Os baixos valores da Tabela 2.6 são explicados pela existência de carvão não recuperado nos rejeitos.

#### *Abrasão Los Angeles*

ZETA-IESA (1983) realizou ensaios de abrasão Los Angeles com as frações R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> e R<sub>3</sub> de rejeitos Barro Branco, provenientes da mina Santa Augusta, já desativada. Os resultados foram elevados, ficando as médias entre 46,5 e 49,3%. A fração R<sub>3</sub> apresentou valores menores e a R<sub>1</sub>, maiores.

#### *Composição química*

Os dois principais componentes químicos dos rejeitos são: o dióxido de silício (sílica, SiO<sub>2</sub>) e o óxido de alumínio (alumina, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). A Tabela 2.7 abaixo apresenta as composições químicas das frações R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> e R<sub>3</sub> de rejeitos Barro Branco, da mina Santa Augusta.

Tabela 2.7 - Composição química de rejeitos grossos Barro Branco (ZETA-IESA, 1983)

Elementos		R1	R2	R3	Média
SiO <sub>2</sub>	%	43,3	59,1	58,2	53,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	33,3	33,5	34,3	33,7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	12,7	3,2	3,0	6,3
TiO <sub>2</sub>	%	2,1	2,5	2,4	2,3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0,4	0,1	0,1	0,2
CaO	%	0,7	0,2	0,5	0,5
MgO	%	0,6	0,4	0,3	0,4
Na <sub>2</sub> O	%	0,6	0,3	0,2	0,4
K <sub>2</sub> O	%	1,8	0,6	0,9	1,1

## **CAPÍTULO 3 – COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PEDREGULHOS E ENROCAMENTOS**

### **3.1. INTRODUÇÃO**

Este capítulo se destina a apresentar os aspectos mais importantes do comportamento mecânico de pedregulhos e enrocamentos, tendo como base diversos estudos existentes na bibliografia. Atenção especial é dada aos principais fatores que afetam o comportamento mecânico desses materiais. Adota-se a terminologia proposta na normatização brasileira (NBR 6502), que define pedregulhos como solo composto por partículas com diâmetro compreendido entre 2,0 e 60,0mm. Admite-se como enrocamento todo material granular de origem mineral composto, preponderantemente, por partículas maiores que 60,0mm, podendo conter até 10% de finos menores que 0,074mm (Neves, 2002).

Decidiu-se por agrupar pedregulhos e enrocamentos numa mesma classe de material sob o ponto de vista de comportamento mecânico, muito embora possam existir entre eles diferenças significativas quanto às dimensões das partículas constituintes. Esse enfoque metodológico permite estudar de maneira mais adequada a compressibilidade e resistência de rejeitos de carvão, cujas partículas freqüentemente possuem dimensões maiores que 60,0mm, muito embora mais de 90% delas fiquem abaixo desse limite. Tal procedimento é justificado por dados experimentais existentes na bibliografia (Marsal, 1973; Charles e Watts, 1980; Indraratna *et al*, 1993), os quais sugerem que o comportamento de ambos os materiais é condicionado pelos mesmos fatores, embora em graus diferentes.

### **3.2. FATORES INTERVENIENTES**

Os principais fatores físicos e mecânicos que influenciam o comportamento mecânico de pedregulhos e enrocamentos podem ser agrupados em três classes:

- estado de tensão;
- partículas constituintes;
- meio granular formado pelas partículas.

Nas páginas que se seguem cada classe e suas divisões serão analisadas detalhadamente.

### 3.2.1. Estado de tensão

A compressibilidade e a resistência ao cisalhamento de um meio granular constituído principalmente por partículas de pedregulho e enrocamento são afetadas significativamente pelo estado de tensão a que ele está submetido. Quanto maior for a tensão de confinamento atuante, maiores serão as tensões de contato entre as partículas e, portanto, mais próximas elas estarão da ruptura ou quebra. Esta quebra causa aumento da compressibilidade e diminuição resistência do meio granular, o que se reflete na redução de volume e no formato curvo da envoltória de ruptura, respectivamente. Esse fenômeno depende de diversos fatores, sendo os principais: a resistência mecânica das partículas e as tensões de contato entre elas.

A quebra pode ocorrer somente nos contatos ou abranger toda a partícula. Em ambos os casos aumenta a quantidade e diminui o diâmetro médio das partículas, fazendo com que diminua a magnitude das forças de contato entre elas, o que, por sua vez, reduz novas quebras. Estes fenômenos dependem fortemente do grau de imbricamento das partículas, isto é, de suas posições relativas e facilidade que têm de se movimentarem no interior do meio granular, o que está estreitamente relacionado com o grau de compacidade. Em ensaios de cisalhamento direto ou triaxiais, por exemplo, altos níveis de imbricamento resultam em elevada dilatância, aumentando as forças de contato e, conseqüentemente, intensificando o fraturamento (Maia, 2001).

A magnitude das forças de contato entre partículas depende, além da tensão de confinamento, das dimensões das partículas e de sua distribuição granulométrica. Para uma mesma tensão de confinamento, quanto maior o diâmetro das partículas e mais uniforme a distribuição granulométrica, maiores serão as forças de contato. Diversos estudos já demonstraram que, para um mesmo material rochoso e mesma tensão de confinamento, o ângulo de atrito interno diminui com o aumento da dimensão média das partículas (Leps, 1970; Marsal, 1973; Veiga Pinto, 1979; Indraratna *et al.*, 1993; Neves, 2002).

Leps (1970) analisou detalhadamente a influência da tensão de confinamento na resistência ao cisalhamento recorrendo a resultados de cerca de 100 ensaios triaxiais consolidados-drenados, realizados com 15 variedades diferentes de materiais rochosos. Indraratna *et al.* (1993) complementou esses dados com resultados de ensaios em enrocamentos utilizados na construção de barragens na Tailândia. A Figura 3.1 resume os dados existentes, mostrando a variação do ângulo de atrito interno  $\phi'$  em função da tensão normal efetiva  $\sigma'$  no plano de ruptura (Veiga Pinto, 1979; Maia, 2001).

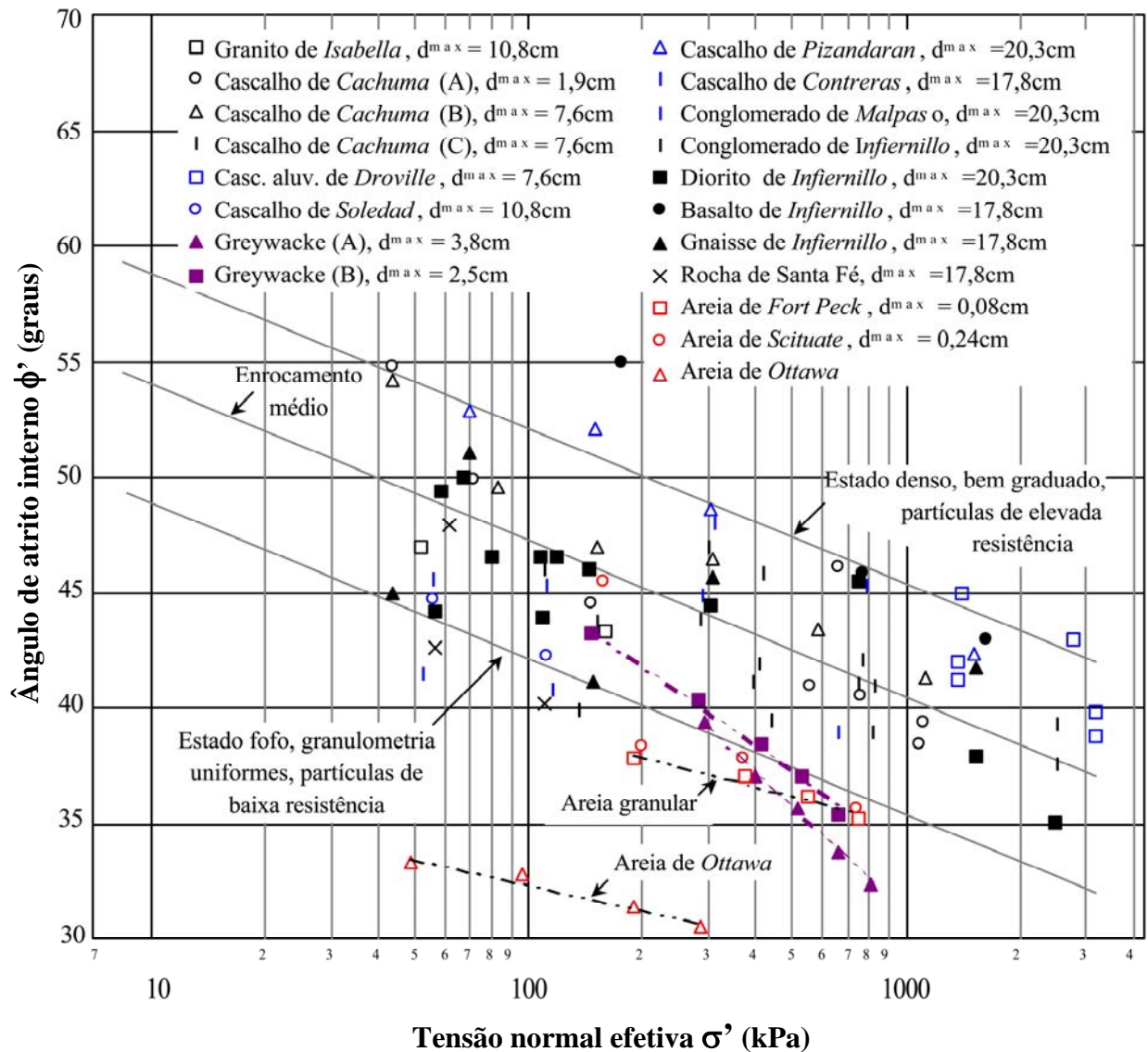


Figura 3.1 - Variação do ângulo de atrito interno com a tensão normal efetiva no plano de ruptura em enrocamentos (Leps, 1970 e Indraratna *et al.* 1993, *apud* Maia, 2001)

Na legenda da Figura 3.1 estão indicados os diâmetros máximos de partículas das amostras ensaiadas ( $d_{\max}$ ). Os rejeitos de carvão, classificados como pedregulhos, possuem partículas com diâmetro máximo semelhante a diversos materiais estudados (em torno de 7,5cm).

A redução do ângulo de atrito com o aumento da tensão de confinamento também pode ser identificada pelo formato não-linear das envoltórias de ruptura Mohr-Coulomb. Charles e Watts (1980) realizaram ensaios triaxiais consolidados-drenados com pedregulhos contendo partículas com dimensão máxima de 38mm, utilizando corpos de prova com 230mm de diâmetro e 500mm de altura. Três tipos de rocha foram testados: arenito, basalto e ardósia. As envoltórias obtidas,

cada uma com quatro corpos prova, são apresentadas na Figura 3.2. O formato curvo é típico de pedregulhos e enrocamentos submetidos a tensões de confinamento medianas e altas.

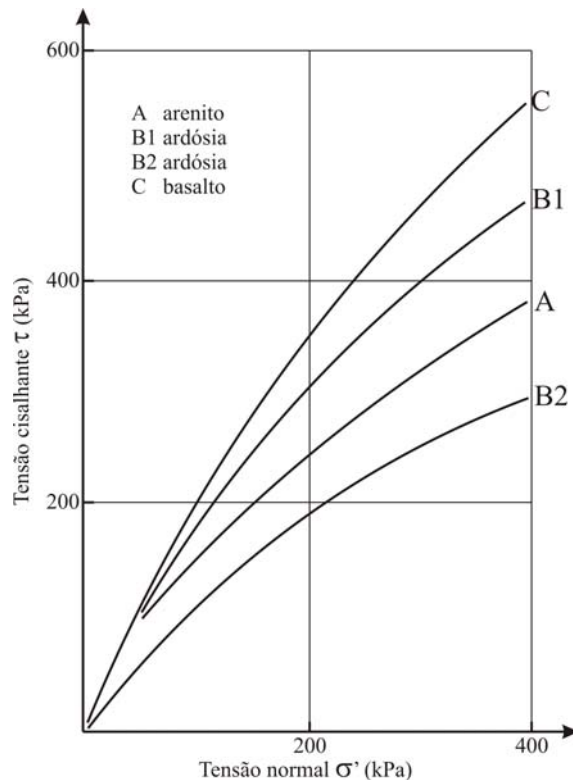


Figura 3.2 - Envoltórias de ruptura não-lineares (adaptado de Charles e Watts, 1980)

De Mello (1977) propôs que as envoltórias de ruptura de enrocamentos fossem expressas por uma equação do tipo:

$$\tau = a \cdot \sigma'^b \quad (3.1)$$

onde  $\tau$  e  $\sigma$  são, respectivamente, as tensões cisalhante e normal ao plano de ruptura e  $a$  e  $b$  parâmetros adimensionais característicos do material, obtidos por meio do ajuste das curvas aos resultados dos ensaios de resistência (Neves, 2002). Indraratna *et al.* (1993) propôs uma metodologia alternativa para obtenção desses parâmetros, utilizando a resistência da rocha matriz, obtida com ensaios de compressão simples.

A deformabilidade de pedregulhos e enrocamentos está associada a dois efeitos distintos na estrutura do meio granular. O primeiro é a compressão elástica das partículas, que pode anular-se subitamente quando a tensão nos contatos atingir a tensão resistente das mesmas, causando quebra. O segundo é a reorganização das partículas fraturadas, por meio de deslizamento e/ou rolamento, formando um novo estado de equilíbrio. No meio granular, enquanto algumas

partículas estão sendo comprimidas elasticamente, ou nem mesmo estão sendo solicitadas, outras já quebraram e estão se reorganizando (Veiga Pinto, 1979; Pacheco, 2005).

### 3.2.2. Características das partículas

As principais características das partículas que influenciam no comportamento mecânico de pedregulhos e enrocamentos são: 1) resistência ao fraturamento, 2) forma, 3) coeficiente de atrito e 4) estado de alteração.

#### 3.2.2.1. Resistência ao fraturamento

Marsal (1969) conclui, a partir de estudos anteriores, que a resistência ao esmagamento  $P_a$  de uma partícula rochosa é dada pela equação:

$$P_a = \eta \cdot d_m^\lambda \quad (3.2)$$

onde  $d_m$  é a dimensão média da partícula e  $\eta$  e  $\lambda$  são parâmetros dependentes da litologia da mesma.

Para determinação de  $P_a$ , Marsal (1973) propôs uma metodologia de ensaio que consiste na colocação de três partículas de pedregulho, de dimensões aproximadamente iguais, entre duas placas de aço e a aplicação de carga até a ruptura de uma delas. É contado o número de contatos entre as partículas e as placas. O valor da carga de ruptura  $P$  é dividido pelo menor número de contatos com as placas (inferior ou superior)  $N_c$ , obtendo-se assim o valor da resistência ao fraturamento  $P_a$ . Após realizar diversos ensaios, com litologias variadas e  $d_m$  de 2,5; 5,0 e 10,0cm, o autor obteve para  $\lambda$  variação de 1,2 até 1,8 e para  $\eta$  variação de 35 até 140 kgf/cm $^\lambda$ .

A quantificação da quebra de partículas pode ser realizada comparando-se as curvas granulométricas antes e após o ensaio. Marsal (1973) propôs a utilização de um índice denominado grau de fraturamento,  $B_g$ . Este é definido pela porcentagem do material, em massa, que sofreu fraturamento. Sejam  $a_1, a_2, \dots, a_n$  as porcentagens das frações retidas das peneiras de 1 a  $n$  do material antes do ensaio e  $a_1', a_2', \dots, a_n'$  as porcentagens retidas nas mesmas peneiras depois do ensaio; calculando a diferença de  $a_i' - a_i$  tem-se parcelas positivas (aumento da fração retida) e negativas (diminuição da fração retida);  $B_g$  é a somatória das parcelas positivas (Pacheco, 2005).

A partir de  $B_g$  pode-se calcular o volume de partículas fragmentadas  $v_f$  em relação ao volume total de sólidos da amostra  $v$ , utilizando a seguinte expressão:



$$\frac{v_f}{v} = \frac{B_g}{1 + e_o} \quad (3.3)$$

onde  $e_o$  é o índice de vazios inicial da amostra (Veiga Pinto, 1979).

Cabe salientar que métodos da determinação de grau de fraturamento baseados na comparação entre a granulometria antes e após o ensaio estão sujeitos a erros decorrentes dos processos de moldagem dos corpos de prova, que pode vir a causar quebra de partículas antes do ensaio. Para minimizá-los, faz-se necessária a determinação do grau de fraturamento causado somente pela compactação, o que permite descontar esse efeito quando das análises de amostras já ensaiadas.

A quebra de partículas depende principalmente da resistência ao fraturamento, distribuição granulométrica e tensão de confinamento (Marsal, 1973). Além disso, é tanto mais significativa quanto maior a angulosidade e o estado de alteração.

### 3.2.2.2. Forma

A forma influencia diretamente o grau de imbricamento das partículas, isto é, suas posições relativas e mobilidade. No início de ensaios de cisalhamento direto ou triaxiais, quando existe maior facilidade de deslocamento das partículas entre si, a angulosidade dos grãos deve auxiliar na resistência ao cisalhamento por dificultar a mobilidade, isto é, aumentar o imbricamento. Porém, num segundo momento, poderá ocorrer perda de resistência devido à quebra de arestas, que possuem menor resistência à fratura do que o corpo das partículas. Todavia, para tensões de confinamento elevadas, o grau de fraturamento de amostras com partículas angulosas e arredondadas é semelhante, visto que as forças de contato são muito altas (Veiga Pinto, 1979; Maia, 2001).

A avaliação da forma das partículas pode ser feita com base em critérios somente geométricos, tomando-se um grande número de partículas e medindo-se comprimento, largura e espessura de cada uma, utilizando paquímetro, por exemplo. A partir das relações entre as dimensões, classifica-se as partículas em arredondadas, irregulares, angulares, achatadas e alargadas (Maia, 2001).

Outra metodologia de classificação, bastante difundida para análise de enrocamentos, utiliza o índice denominado coeficiente de forma  $C_f$ . Para uma partícula, o coeficiente de forma expressa a relação entre o volume da partícula e o volume de uma esfera fictícia equivalente, com diâmetro igual à dimensão média da partícula. Para um conjunto de partículas, o valor de  $C_f$  é dado pela seguinte expressão (Marsal, 1973):

$$C_f = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{\gamma_g}}{\sum_{i=1}^n \frac{\pi}{6} D_i^3} \quad (3.4)$$

onde  $p_i$  é a massa da partícula  $i$ ,  $D_i$  é sua dimensão média e  $\gamma_g$  é a massa específica as partículas. Partículas esféricas apresentam coeficiente de forma  $C_f$  igual a 1,0. Com o aumento da angulosidade, ocorre decréscimo de  $C_f$ .

O efeito da forma no comportamento mecânico tende a ser tanto menos significativo quanto menor for a resistência ao fraturamento das partículas e maior for a tensão de confinamento. Segundo Becker *et al* (1972), no caso de enrocamentos, não há influência relevante da forma das partículas na resistência ao cisalhamento para tensões de confinamento maiores que 0,2 e 1,4 MPa, para materiais de baixa e elevada resistência, respectivamente (Veiga Pinto, 1979).

Da mesma forma, no caso da deformabilidade, enquanto para baixos níveis de tensão a angulosidade reduz a deformabilidade, para níveis elevados este efeito deixa de ocorrer (Veiga Pinto, 1983). Sob estas últimas condições, a influência da forma é pequena quando comparada com a da resistência da rocha de origem.

### 3.2.2.3. Coeficiente de atrito

O grau de interação de uma partícula sobre outra é função também do atrito existente entre elas, o que depende em grande parte de sua constituição mineralógica, além da presença ou não de água. O aumento do coeficiente de atrito resulta em maior interferência.

Em ensaios de resistência, elevados coeficientes de atrito causam aumento da resistência para baixas tensões de confinamento. Neste caso, o efeito é mais pronunciado quando a amostra tem comportamento dilatante, isto é, quando está em estado compacto. Todavia, no caso de amostras em que, seja pela constituição mineralógica ou estado de alteração das partículas, seja devido às tensões confinantes, o efeito de quebra de partículas se sobrepõe largamente ao da dilatância, a influência do coeficiente de atrito é muito pequena (Veiga Pinto, 1979).

### 3.2.2.4. Estado de alteração

A ação do intemperismo sobre pedregulhos e enrocamentos pode exercer influência significativa sobre suas características físicas e mecânicas, além de químicas. Dentro do escopo do presente trabalho, as principais características afetadas são: a distribuição granulométrica e a resistência ao fraturamento das partículas. Quanto mais alteráveis forem os minerais

constituintes e mais intensa a ação do intemperismo, maior atenção deve ser dedicada aos efeitos de alteração.

Observações empíricas indicam que os rejeitos de carvão se alteram com grande facilidade quando expostos às intempéries. Dentre as causas disso estão: a) a presença de minerais expansivos, cujo principal é a pirita, b) a baixa resistência mecânica da rocha de origem e c) a acentuada estratificação e folhamento. Até o momento não se dispõe de estudos científicos que permitam quantificar a alterabilidade de rejeitos com a precisão necessária, muito embora pesquisas correlatas possam ser encontradas, com a de Mendonça *et al.* (2003). Por este motivo, no presente estudo decidiu-se reduzir ao máximo o tempo entre a produção dos rejeitos e a realização dos ensaios de caracterização e mecânicos, de forma a se trabalhar somente com rejeitos não alterados.

### **3.2.3. Características do meio granular**

As principais características do meio granular que interferem no comportamento mecânico de pedregulhos e enrocamentos são: 1) distribuição granulométrica, 2) estado de compactidade 3) adição ou não de água e 4) fluência.

#### **3.2.3.1. Distribuição granulométrica**

A distribuição granulométrica é importante, sobretudo, devido à influência sobre a quebra das partículas. Se o material é bem graduado, as partículas menores ocupam grande parte dos vazios existentes entre as maiores, resultando em aumento do número de contatos. Para uma mesma tensão confinante, o aumento do número de contatos acarreta diminuição das forças atuantes em cada um deles, resultando em menos quebra de partículas. No caso de granulometria uniforme ocorre o oposto, motivo pelo qual o grau de fraturamento é mais intenso. Portanto, materiais bem graduados tendem a serem menos compressíveis e a possuírem maior resistência.

Estudando enrocamentos, Leslie (1969) e Donaghe e Cohen (1978) *apud* Veiga Pinto (1979) verificaram que, em ensaios de compressão triaxial, a resistência ao cisalhamento é mais afetada pelo coeficiente de uniformidade do que pela dimensão das partículas.

Ensaio de compressão unidimensional com enrocamentos realizado por Kjærnsli e Sande (1963) e Sowers *et al* (1965) *apud* Veiga Pinto (1979) mostraram que, quando compactados com mesma energia, pedregulhos e enrocamentos com granulometria uniforme são mais compressíveis do que outros bem graduados. Donaghe e Cohen (1978) chegaram à mesma conclusão, porém consideraram que para  $C_u > 7$  o efeito é desprezível.

### 3.2.3.2. Estado de compacidade

O estado de compacidade é uma das variáveis mais influentes no comportamento mecânico de materiais não coesivos, sejam eles areias, pedregulhos ou enrocamentos. O índice mais utilizado para quantificar a compacidade é a densidade relativa  $D_r$ . Para um mesmo material, o aumento da densidade relativa causa diminuição da compressibilidade. Já a resistência de enrocamentos aumenta com a densidade relativa somente para tensões de confinamento baixas ou médias, enquanto para tensões elevadas sua influência é pequena, isto é, materiais fofos ou densos tendem a ter a mesma resistência (Veiga Pinto, 1979).

Nichiporovitch e Rasskazov (1969) *apud* Veiga Pinto (1979), estudando pedregulhos, consideram que, num material granular denso, uma variação de 1% na massa específica aparente seca causa variação também de 1% no ângulo de atrito interno. Todavia, Veiga Pinto (1979) sustenta que isto é válido somente para tensões octaédricas baixas, da ordem de 100kPa. Para valores cima de 2500kPa a variação no ângulo de atrito seria de, aproximadamente, 0,5%.

O índice de vazios de um material granular compactado é função principalmente da energia de utilizada, da distribuição granulométrica e, em menor grau, da forma das partículas. Quando compactados com igual energia, materiais bem graduados, em geral, possuem menor índice de vazios do que aqueles com granulometria uniforme. Mantidas as demais variáveis, os primeiros tendem a ser menos compressíveis e a possuir maior resistência que os segundos. Além disso, o módulo de elasticidade dos materiais bem graduados tende ser maior.

### 3.2.3.3. Adição de água

Diversos estudos, como os de Marsal (1973) Veiga Pinto (1979), Maia (2001) e Pacheco (2005), indicam a que a adição de água em amostras de enrocamento e pedregulhos não submersas durante ensaios de compressão unidimensional aumenta significativamente a compressibilidade, ocasionando o fenômeno conhecido por colapso. Isto geralmente é explicado pelo fato da molhagem conduzir ao enfraquecimento dos contatos entre partículas e à redução da resistência da rocha matriz.

Em laboratório, a molhagem e/ou saturação das partículas antes do ensaio também afeta significativamente os resultados. Ensaios de compressão unidimensional de enrocamentos realizados por Donaghe e Cohen (1978) *apud* Veiga Pinto (1979) indicaram aumento da ordem de 30% na compressibilidade para tensão vertical de 5,0MPa, quando os corpos de prova foram moldados após as partículas terem sido imersas em água por 24 horas.

#### **3.2.3.4. Fluência**

Em um material granular, denomina-se fluência a ocorrência de deformações lentas quando o material está submetido à tensão efetiva constante. Em areias este fenômeno é, em geral, menos significativo do que em enrocamento e pedregulhos. Isso pode ser explicado pela elevada resistência das partículas das areias em relação às tensões que normalmente ocorrem nos contatos, fazendo com que predominem o deslizamento entre partículas sobre o fraturamento.

Em pedregulhos e enrocamentos a fluência exerce papel importante, provavelmente porque as partículas estão mais próximas da ruptura. Nestes materiais, a fluência ocorre tanto por deslizamento como por esmagamento dos contatos e fraturamento das partículas (Neves, 2002).

### **3.3. ENSAIOS DE LABORATÓRIO DE GRANDES DIMENSÕES**

#### **3.3.1. Compressibilidade**

##### **3.3.1.1. Compressão Unidimensional**

Os ensaios de compressão unidimensional simulam trajetórias de tensões  $K_0$ , isto é, seguidas por elementos cujas solicitações impedem deformações transversais ao eixo de aplicação do carregamento. Este tipo de solicitação ocorre em elementos situados no eixo de simetria de aterros, desde que o aterro seja construído mantendo simetria de carregamento. Por ser relativamente simples, é o ensaio mais utilizado para avaliar a compressibilidade de pedregulhos e enrocamentos (Pacheco, 2005).

Na maioria dos equipamentos de compressão unidimensional de grandes dimensões existem dificuldades na determinação das forças de atrito existentes entre o corpo de prova e a parede interna da célula de compressão. Estes dados são de fundamental importância para correta avaliação dos parâmetros de compressibilidade, já que essas forças devem ser descontadas da força total aplicada no topo do corpo de prova.

Uma alternativa à medição das forças de atrito é minimizar o atrito utilizando células compressíveis, como a utilizada por Veiga Pinto (1983). Nessa foram intercalados anéis de alumínio duro com anéis de borracha, que se deformam juntamente com o corpo de prova.

O equipamento utilizado na presente pesquisa, desenvolvido por Pacheco (2005), é capaz de quantificar o atrito lateral, conforme descrito no Capítulo 6. O mesmo autor apresenta, em sua revisão sobre o assunto, diferentes tipos de equipamentos de compressão unidimensional já desenvolvidos em diversos países.

As tensões horizontais atuantes nas paredes da célula de compressão também podem ser determinadas neste tipo de ensaio. Para isto, a instalação de extensômetros elétricos (*strain gages*) na parte externa da parede da célula é uma alternativa corrente. Correlaciona-se as deformações da parede com as tensões horizontais, a partir de equações de equilíbrio dadas pela teoria da elasticidade. Pode-se então calcular o coeficiente de empuxo no repouso  $K_0$ . Esse foi o método utilizado na presente pesquisa.

### **3.3.1.2. Compressibilidade em câmaras triaxiais**

Outra forma de determinar os parâmetros de compressibilidade de pedregulhos e enrocamentos é utilizando equipamentos triaxiais de grandes dimensões, seguindo trajetórias de tensão  $K_0$  ou outra trajetória, a depender do ponto do corpo do aterro que se está estudando. Nestes ensaios encontram-se soluções mais precisas e confiáveis tanto para o problema do atrito lateral como para a determinação do coeficiente de empuxo, quando comparadas às obtidas nos ensaios de compressão unidimensional. Quanto ao atrito, as membranas de borracha que revestem os corpos de prova geralmente aceitam grandes deformações sem desenvolvimento de atrito significativo. O  $K_0$  é determinado conhecendo-se relação entre: a) a variação da tensão horizontal necessária para impedir a deformação horizontal do corpo de prova e b) a variação da tensão vertical.

### **3.3.2. Resistência ao cisalhamento**

#### **3.3.2.1. Cisalhamento Direto**

A principal vantagem dos equipamentos de cisalhamento direto é sua simplicidade quando comparados aos triaxiais, convencionais e verdadeiros, ou de deformação plana. Seu principal problema é a não-uniformidade das tensões e deformações no corpo de prova durante a etapa de cisalhamento, devido principalmente à rigidez das paredes da caixa. Segundo Morgenstern e Tchalenko (1967), no início do ensaio ocorrem concentrações de tensões nas partes do corpo de prova situadas nas bordas da caixa, na direção da força cisalhante, que posteriormente se propagam para o centro, a medida que as deformações cisalhantes aumentam. Os autores estudaram este efeito utilizando corpos de prova de caulinita de  $6,0\text{cm} \times 6,0\text{cm} \times 2,5\text{cm}$ . A Figura 3.3 ilustra esse processo de surgimento de múltiplas descontinuidades nos corpos de prova durante os ensaios.

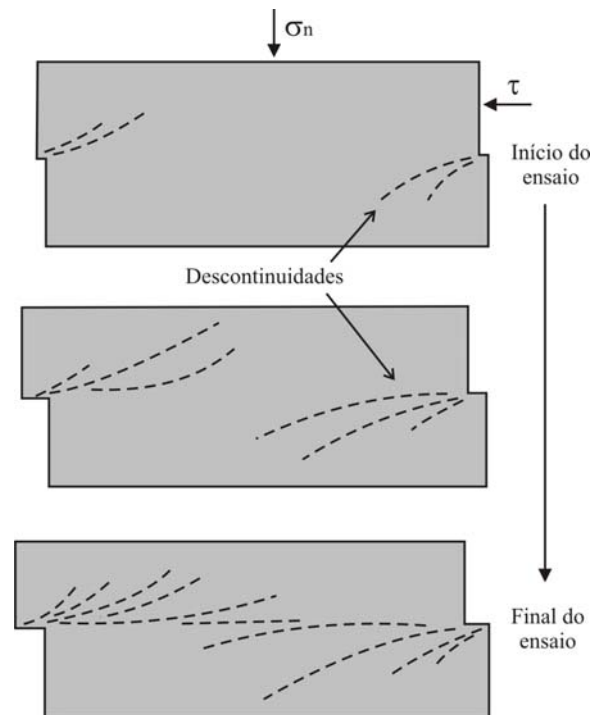


Figura 3.3 - Evolução de descontinuidades durante ensaios de cisalhamento direto com corpos de prova de caulinita (modificado de Morgenstern e Tchalenko, 1967)

Os parâmetros de resistência de pedregulhos e enrocamentos obtidos nos ensaios de cisalhamento direto são, normalmente, superiores aos obtidos nos ensaios de compressão triaxial (Becker *et al.*, 1972; Nitchiporovitch e Rasskazov, 1976; Cea, 1998 *apud* Maia, 2001). Isto é explicado pela rotação que ocorre com as direções das tensões principais durante o ensaio e pela imposição de um plano de cisalhamento. Além disso, observa-se maior dilatância do material na ruptura, em relação a ensaios de compressão triaxial (Cea, 1998).

A velocidade de deformação cisalhante deve ser baixa suficiente para impedir surgimento de excessos de pressão neutra, já que as tensões medidas são consideradas tensões efetivas. Maia (2001) adotou velocidades correspondentes a 1% de deformação cisalhante por minuto, o que resultou em 0,45mm/min para caixa com lados de 30cm  $\times$  30cm e 1,5mm/min para caixa de 100cm  $\times$  100cm.

Para a presente pesquisa foi desenvolvido, no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC, um equipamento de cisalhamento direto para ensaiar corpos de provas de 70cm  $\times$  70cm  $\times$  70cm. A descrição detalhada do mesmo é apresentada no Capítulo 4. Os procedimentos de ensaios são abordados no Capítulo 6.

### 3.3.2.2. Equipamentos Triaxiais e de Deformação Plana

Os ensaios triaxiais são mais adequados para avaliar a resistência ao cisalhamento do que ensaios de cisalhamento direto, já que oferecem maior liberdade de deformação ao corpo de prova, além de geralmente serem capazes de simular diferentes trajetórias de tensões. Todavia, em alguns casos, como o de barragens, em geral, o ensaio que melhor reproduz os estados de tensão e deformação é o de deformação plana (Veiga Pinto, 1979; Maia, 2001).

Em geral, para um mesmo material, corpos de prova ensaiados em equipamentos de deformação plana apresentam resistência ao cisalhamento maior que os ensaiados em equipamentos de compressão triaxial (Veiga Pinto, 1979; Maia, 2001; Douglas, 2002). Nos primeiros a deformação é nula na direção da tensão principal intermediária, fazendo com que, na região cisalhada, a probabilidade de uma partícula ser obstruída por outra seja maior do que sob condição axissimétrica. Isto causa aumento do imbricamento e, conseqüentemente, maior resistência ao cisalhamento. Nos ensaios de compressão triaxial, as partículas possuem menor restrição de movimento. Além disso, as tensões normais atuantes no plano de ruptura tendem a serem mais elevadas nos ensaios de deformação plana em relação aos ensaios de compressão triaxial.

Becker *et al.* (1972) *apud* Veiga Pinto (1979) apresentaram resultados de ensaios com enrocamento em que para corpos de prova densos e submetidos à tensões de confinamento abaixo de 700 kPa, o ângulo de atrito obtido com ensaios de deformação plana foi de 3 a 6° maior do que para ensaios de compressão triaxial. Para tensões maiores que 2800 kPa, a diferença foi de 1 a 3°.

Marachi *et al.* (1969) *apud* Veiga Pinto (1979) sustentam que amostras de materiais granulares densos, submetidas a baixas tensões de confinamento e ensaiadas sob deformação plana possuem as seguintes características quando comparadas aos ensaios de compressão triaxial: maior resistência ao cisalhamento, maior módulo de elasticidade, menor deformação axial, menor dilatação volumétrica e igual resistência ao cisalhamento residual.

## 3.4. REJEITOS DE BENEFICIAMENTO CARVÃO MINERAL

### 3.4.1. Introdução

No Brasil existem poucos estudos sobre comportamento mecânico de rejeitos de beneficiamento de carvão mineral. Encontra-se na bibliografia preponderantemente estudos sobre deposição e isolamento de rejeitos, tais como o de Mendonça *et al* (2003a), e sobre geração de drenagem ácida, estudado por Mendonça *et al* (2003b) e Ortiz e Teixeira (2002),



entre outros. O autor desta dissertação e seu orientador publicaram, no ano de 2004, resultados de ensaios de compressibilidade e resistência realizados em equipamentos laboratoriais de dimensões convencionais. Os principais resultados obtidos são apresentados a seguir.

### 3.4.2. Estudos de Maccarini e Hummes (2004)

Resistência e a compressibilidade de rejeitos foram estudadas por Maccarini e Hummes (2004) utilizando equipamentos convencionais de cisalhamento direto e compressão unidimensional, por meio de modelação física da granulometria dos materiais. Com amostras coletadas em campo foram compostas novas curvas granulométricas para adequar o tamanho máximo de partículas às dimensões dos equipamentos disponíveis. Foram utilizadas tanto curvas granulométricas paralelas e como não-paralelas às de campo. A litologia das amostras ensaiadas era a mesma das coletadas em campo. A relação entre a menor dimensão dos corpos de prova e o maior diâmetro de partícula foi de 4,7 para os dois tipos de ensaios. Foram estudados rejeitos Barro Branco e Bonito da bacia carbonífera catarinense, provenientes de duas minas situadas no município de Lauro Müller, ambas de propriedade da Companhia Carbonífera Catarinense Ltda.

#### 3.4.2.1. Caracterização física

As curvas granulométricas de campo são apresentadas na Figura 3.4.

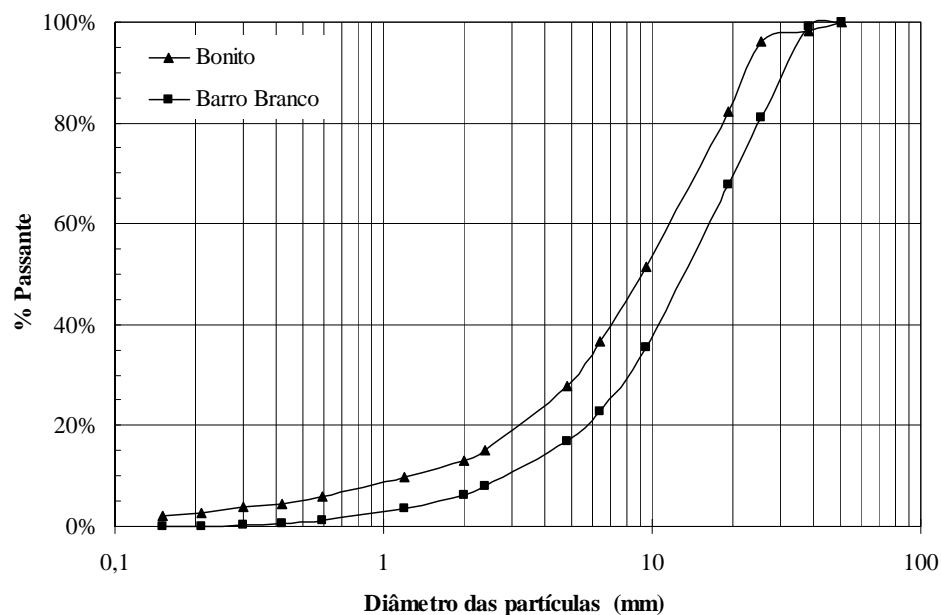


Figura 3.4 – Curvas granulométricas de campo (modificado de Maccarini e Hummes, 2004)

As massas específicas das partículas das amostras coletadas em campo e ensaiadas são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Massas específicas das partículas ( $\gamma_g$ )

Rejeito	Massa específica das partículas (g/cm <sup>3</sup> )	
	Campo	Ensaio
Bonito	2,27	2,23
Barro Branco	2,79	2,83

As massas específicas aparentes secas dos rejeitos compactos, fofos e as utilizadas nos ensaios são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Massas específicas aparentes secas ( $\gamma_s$ )

Rejeito	Massa específica aparente seca (g/cm <sup>3</sup> )		
	Compactado	Fofo	Ensaio
Bonito	1,76	1,15	1,46
Barro Branco	1,93	1,41	1,67

Os índices de vazios máximo, mínimo e dos corpos de prova ensaiados, além das densidades relativas desses últimos, estão apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Índices de vazios máximos  $e_{máx}$ , mínimos  $e_{mín}$  e de ensaios e densidade relativa

Rejeito	Índices de vazios			Densidade relativa (%)
	Máximo	Mínimo	Ensaio	
Bonito	0,94	0,27	0,53	69,9
Barro Branco	1,01	0,47	0,69	75,8

#### 3.4.2.2. Resistência ao cisalhamento

Maccarini e Hummes (2004) realizaram 16 ensaios de cisalhamento direto, que deram origem a quatro envoltórias de ruptura. Duas envoltórias, uma para rejeito Bonito e outra para Barro Branco, foram obtidas para amostras com curvas granulométricas paralelas às de campo, com partículas de diâmetro máximo de 7,9mm. As outras duas foram determinadas para o rejeito

Bonito, com curvas granulométricas não-paralelas, tendo sido somente descartadas as partículas maiores. Nesse último caso, uma amostra possuía partículas de até 7,9mm e outra de até 4,8mm de diâmetro. Os corpos de prova tinham dimensões de  $101,6 \times 101,6 \times 37,0$ mm. Todos os 16 ensaios foram realizados com corpos de prova submersos. Cada envoltória foi determinada com 4 ensaios. Foram utilizadas tensões normais iniciais de 50, 150, 250 e 350kPa. A Figura 3.5 apresenta as duas envoltórias para amostras com curvas granulométricas paralelas.

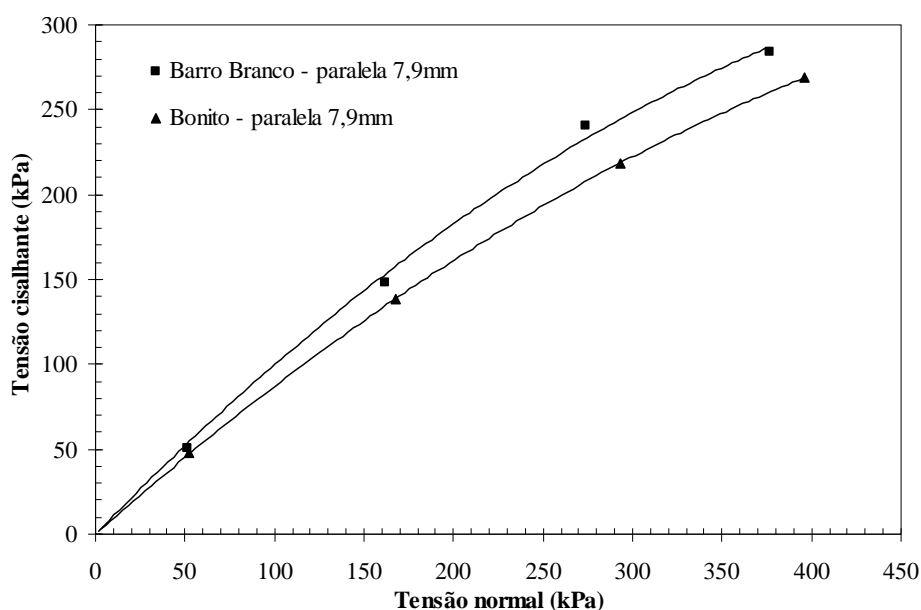


Figura 3.5 - Envoltórias de ruptura dos rejeitos Barro Branco e Bonito com curvas granulométricas paralelas às de campo (modificado de Maccarini e Hummes, 2004)

Nota-se tendência curva das duas envoltórias da Figura 3.5. No início das curvas, entre a origem e o primeiro ponto, os ângulos de atrito interno  $\phi'$  dos rejeitos Barro Branco e Bonito são, respectivamente,  $44,5^\circ$  e  $42,5^\circ$ . Na parte final, no trecho entre os dois últimos pontos, estes ângulos são reduzidos para  $26,3^\circ$  e  $26,1^\circ$ , respectivamente.

Foram determinadas as curvas granulométricas após os ensaios para as amostras misturadas dos ensaios com tensões normais de 250 e 350kPa. As Figuras 3.6 e 3.7 apresentam as curvas granulométricas de campo, antes dos ensaios e depois.

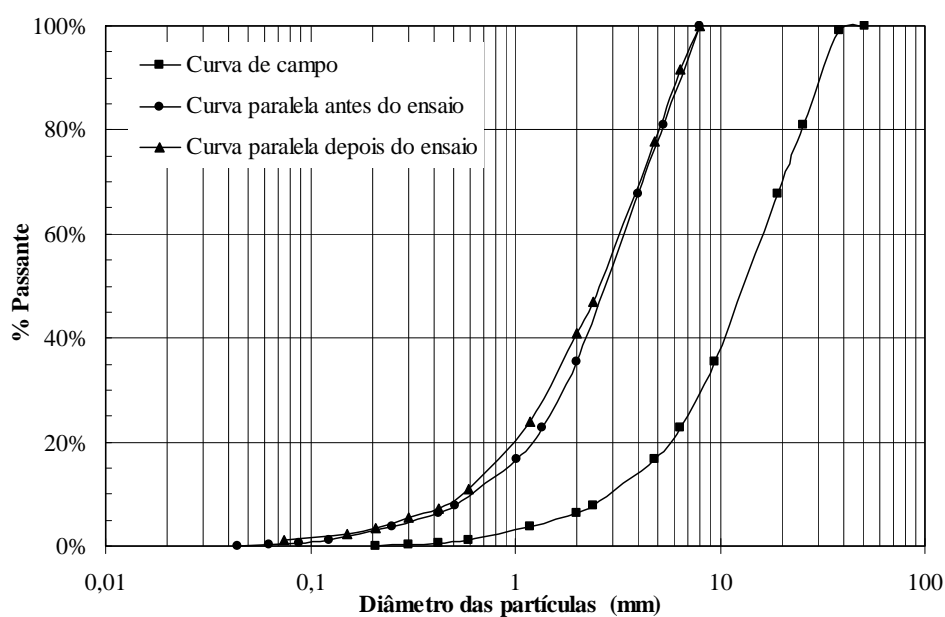


Figura 3.6 - Rejeito Barro Branco: curvas granulométricas antes e depois dos ensaios (modificado de Maccarini e Hummes, 2004)

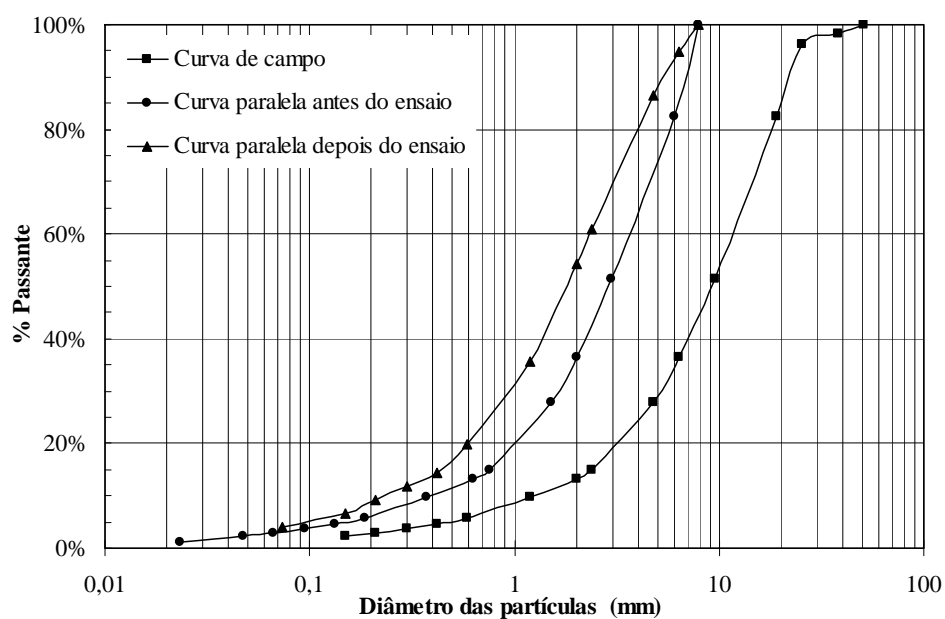


Figura 3.7 - Rejeito Bonito: curvas granulométricas antes e depois dos ensaios (modificado de Maccarini e Hummes, 2004)

Nota-se que a quebra de partículas foi mais acentuada nos ensaios com o rejeito Bonito.

A Figura 3.8 apresenta as envoltórias com granulometrias não-paralelas, com partículas até 7,9mm e 4,8mm, e a com granulometria paralela. As envoltórias com granulometria não-paralela, obtidas somente a partir da retirada da fração grossa, tiveram tendência linear.

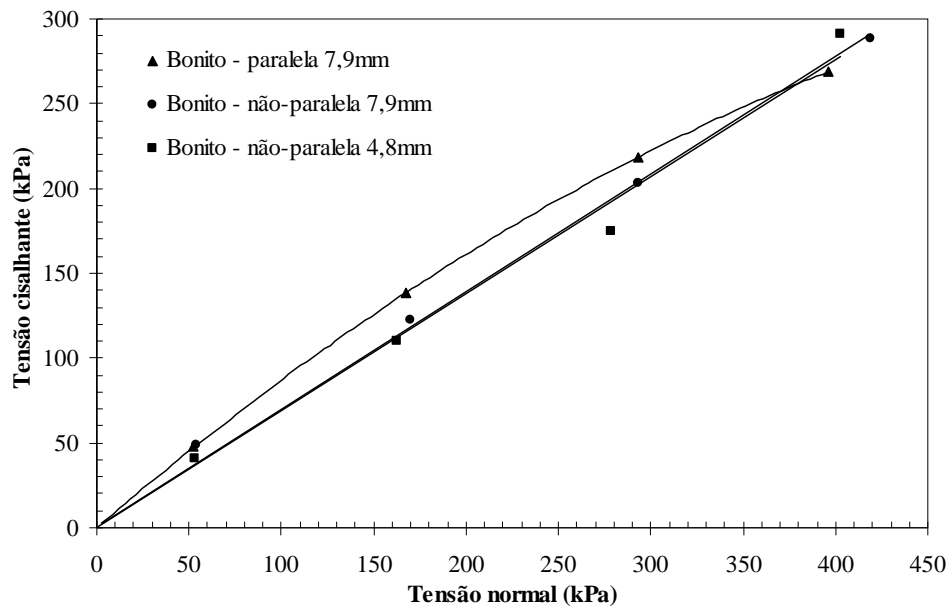


Figura 3.8 - Envoltórias de ruptura do rejeito Bonito com curvas granulométricas paralelas e não-paralelas (modificado de Maccarini e Hummes, 2004)

O ângulo de atrito  $\phi'$  foi praticamente o mesmo para as duas envoltórias com granulometrias não-paralelas, igual a  $34,5^\circ$ . Todavia, nota-se significativa dispersão de resultados na amostra com diâmetro máximo de 4,8mm.

### 3.4.2.3. Compressibilidade

Os corpos de prova utilizados por Maccarini e Hummes (2004) nos ensaios de compressão unidimensional eram cilíndricos, com diâmetro de 100,0mm e altura de 37,0mm. Os ensaios foram realizados com corpos de prova submersos. Foram adotados os seguintes estágios de carregamento: 10, 20, 40, 80, 160 e 320kPa. Os estágios de descarregamento foram: 160, 80, 40 e 20kPa. As Figuras 3.9 e 3.10 apresentam as curvas de compressibilidade obtidas com as amostras com curvas granulométricas paralelas às de campo, com partículas de até 7,9mm de diâmetro.

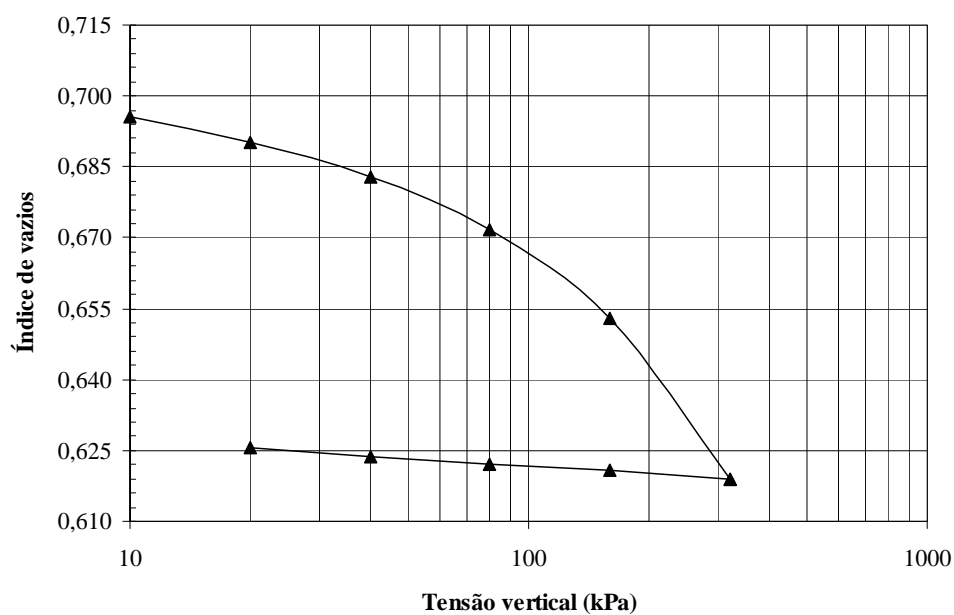


Figura 3.9 - Curva de compressibilidade do rejeito Barro Branco, curva paralela com  $d_{\text{máx}} = 7,9\text{mm}$  (modificado de Maccarini e Hummes, 2004)

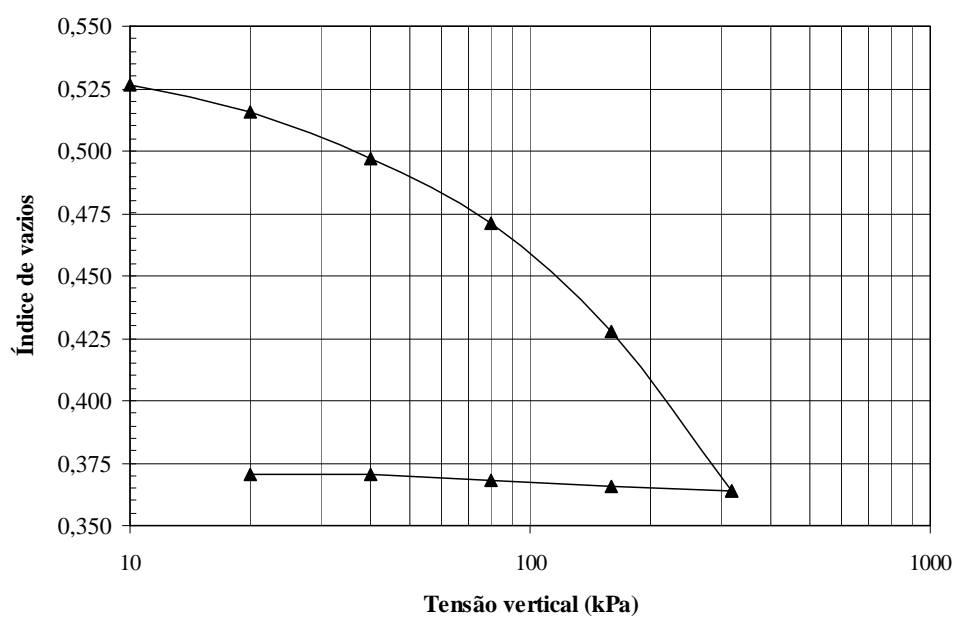


Figura 3.10 - Curva de compressibilidade do rejeito Bonito, curva paralela com  $d_{\text{máx}} = 7,9\text{mm}$  (modificado de Maccarini e Hummes, 2004)

Embora as densidades relativas dos corpos de prova fossem semelhantes (69,9 e 75,8% para rejeitos Bonito e Barro Branco, respectivamente) a variação total do índice de vazios do rejeito Bonito foi de 0,17 e do Barro Banco de 0,08, menos da metade.

Os autores também ensaiaram rejeito Bonito com curva granulométrica não-paralela e com  $d_{\text{máx}} = 7,9\text{mm}$ , no mesmo índice de vazios (0,53). A Figura 3.11 apresenta a curva de compressibilidade obtida, juntamente com a da Figura 3.10, anterior.

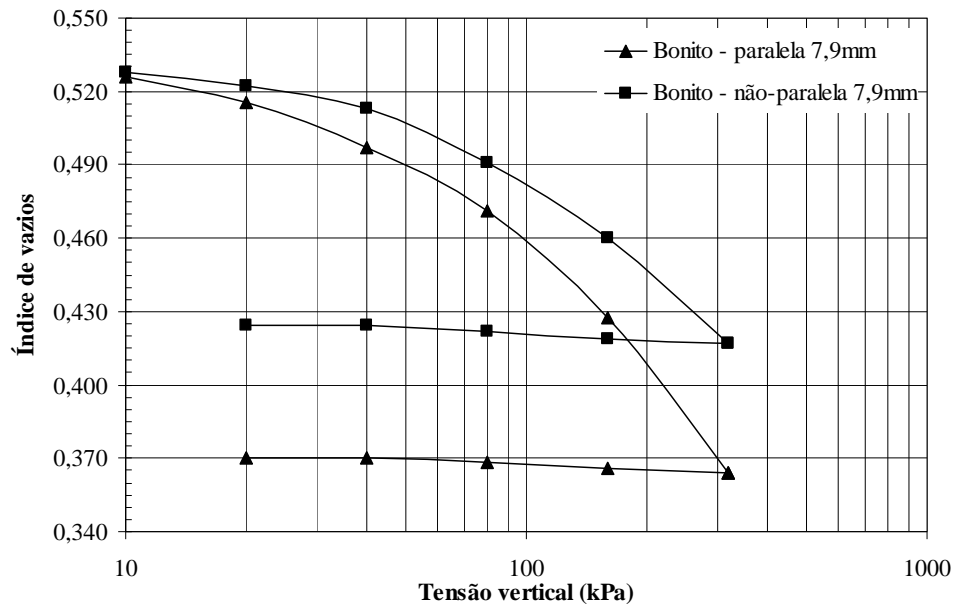


Figura 3.11 - Curvas de compressibilidade do rejeito Bonito, curvas granulométricas paralela e não-paralela, com  $d_{\text{máx}} = 7,9\text{mm}$  (modificado de Maccarini e Hummes, 2004)

A variação total do índice de vazios do corpo de prova com curva granulométrica não-paralela foi de 0,12, significativamente menor do que a variação do com curva paralela, de 0,17.

#### 3.4.2.4. Considerações finais

Os resultados apresentados indicam que:

- o ângulo de atrito interno do rejeito Barro Branco é maior que o do Bonito;
- a utilização de curvas granulométricas paralelas resulta em tendência curva das envoltórias de ruptura, o mesmo não ocorrendo quando somente a fração grossa é descartada (curvas não-paralelas), provavelmente porque o aumento percentual de finos, no caso de curvas não-paralelas, reduz as tensões de contato nas partículas maiores e, conseqüentemente, a quebra dessas últimas;
- o rejeito Bonito apresenta maior quebra de partículas durante o cisalhamento que o Barro Branco;

- d) o rejeito Barro Branco apresenta menor compressibilidade do que o Bonito, apesar de possuir maior índice de vazios no início do ensaio,
- e) amostras com curvas paralelas são mais compressíveis que amostras onde somente a fração grossa foi descartada.

Acredita-se que a resistência ao fraturamento das partículas é o fator determinante no comportamento mecânico dos rejeitos ensaiados. A maior resistência ao fraturamento das partículas Barro Branco contribui significativamente para maior resistência ao cisalhamento e menor compressibilidade do meio granular composto por elas. As curvas granulométricas antes e após os ensaios de cisalhamento direto ajudam a sustentar essa hipótese.

Amostras com curvas granulométricas não-paralelas resultaram em envoltórias de ruptura lineares e menor compressibilidade do que amostras com curvas paralelas. Provavelmente, isto é causado pelo menor fraturamento de partículas no primeiro caso em relação ao segundo.



## **CAPÍTULO 4 – DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO DE CISALHAMENTO DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES**

### **4.1. INTRODUÇÃO**

Para a presente pesquisa foi projetado e construído um equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC, com o objetivo de obter parâmetros de resistência ao cisalhamento dos rejeitos Barro Branco e Bonito. Devido à distribuição granulométrica dos rejeitos, contendo partículas de até 75mm de diâmetro, não havia a possibilidade de utilizar equipamentos convencionais para ensaiá-los na granulometria de campo.

Antes da realização dos ensaios definitivos com os rejeitos foi executado um ensaio exploratório, com brita granítica, com o objetivo de avaliar o desempenho do equipamento.

Este capítulo se destina ao desenvolvimento do equipamento e ao ensaio exploratório.

### **4.2. DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO**

#### **4.2.1. Introdução**

O equipamento de cisalhamento direto foi projetado para se adaptar à estrutura já existente do equipamento de compressão unidimensional de grandes dimensões, também utilizado nesta pesquisa. Ele permite ensaiar corpos de prova de cúbicos de 70cm × 70cm × 70cm. Possui capacidade para aplicar esforço cisalhante de até 500kN. A capacidade de reação do pórtico vertical, já existente, é superior à 2000kN. Em sua capacidade máxima, o equipamento permite simular aterros de rejeito com altura da ordem de 60m. As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam as vistas lateral e frontal do equipamento, respectivamente.

Como já citado, o diâmetro máximo das partículas contidas nos rejeitos é de 75mm, aproximadamente. A relação entre a menor dimensão do corpo de prova e o diâmetro máximo de partícula é da ordem de 9,3, acima do mínimo geralmente adotado para ensaios com enrocamentos, em geral de 5 a 6 (Indraratna et al, 1993; Veiga Pinto, 1983).

Projetou-se o equipamento para trabalhar com velocidade constante de deformações cisalhantes. Impõe-se deformações cisalhante e mede-se as forças cisalhantes correspondentes, por meio de célula de carga. A tensão cisalhante é calculada a partir dessas medidas e da área

corrigida do plano de cisalhamento, que vai diminuindo a medida que o ensaio avança. A tensão normal no plano de ruptura é mantida constante.

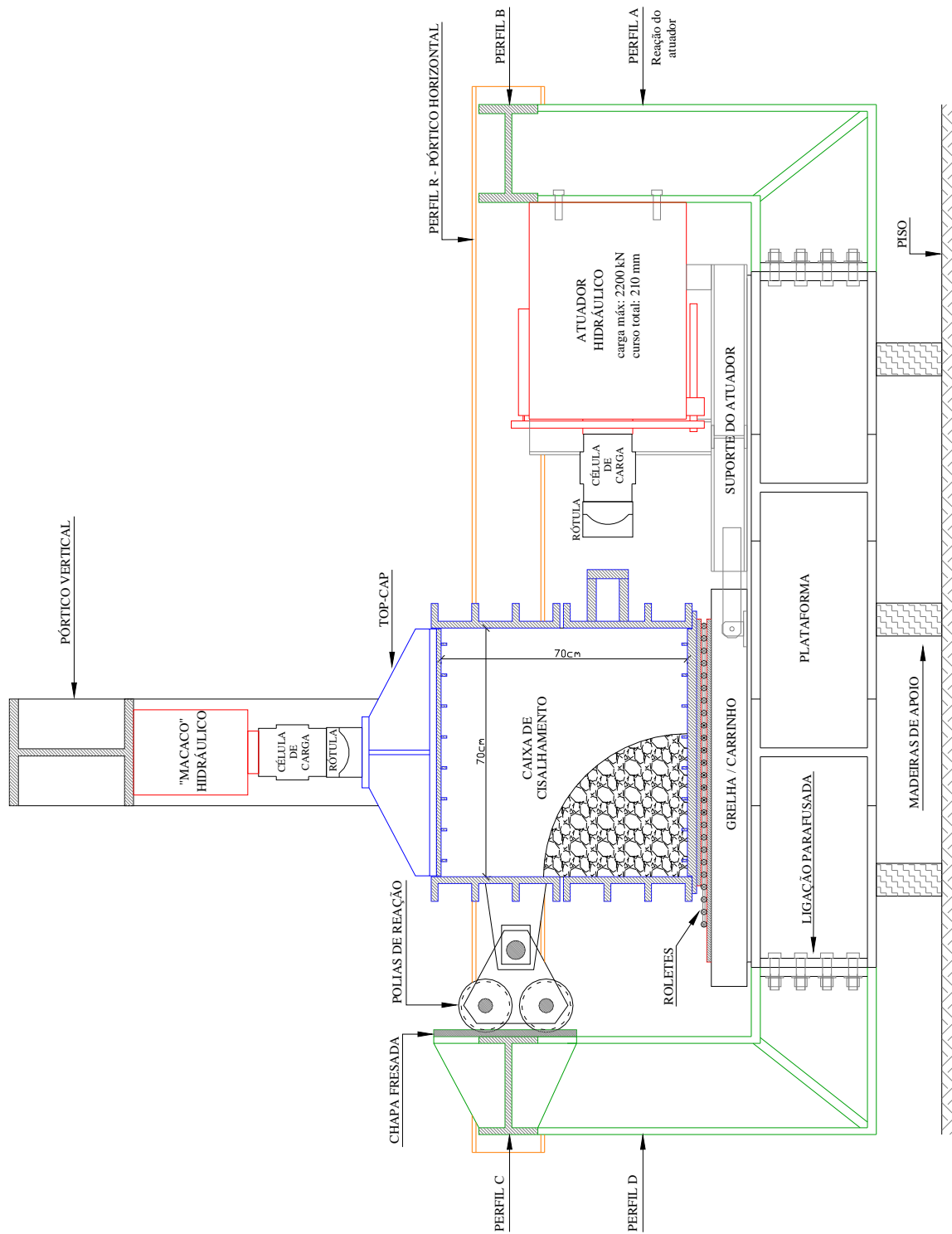


Figura 4.1 - Vista lateral do equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões

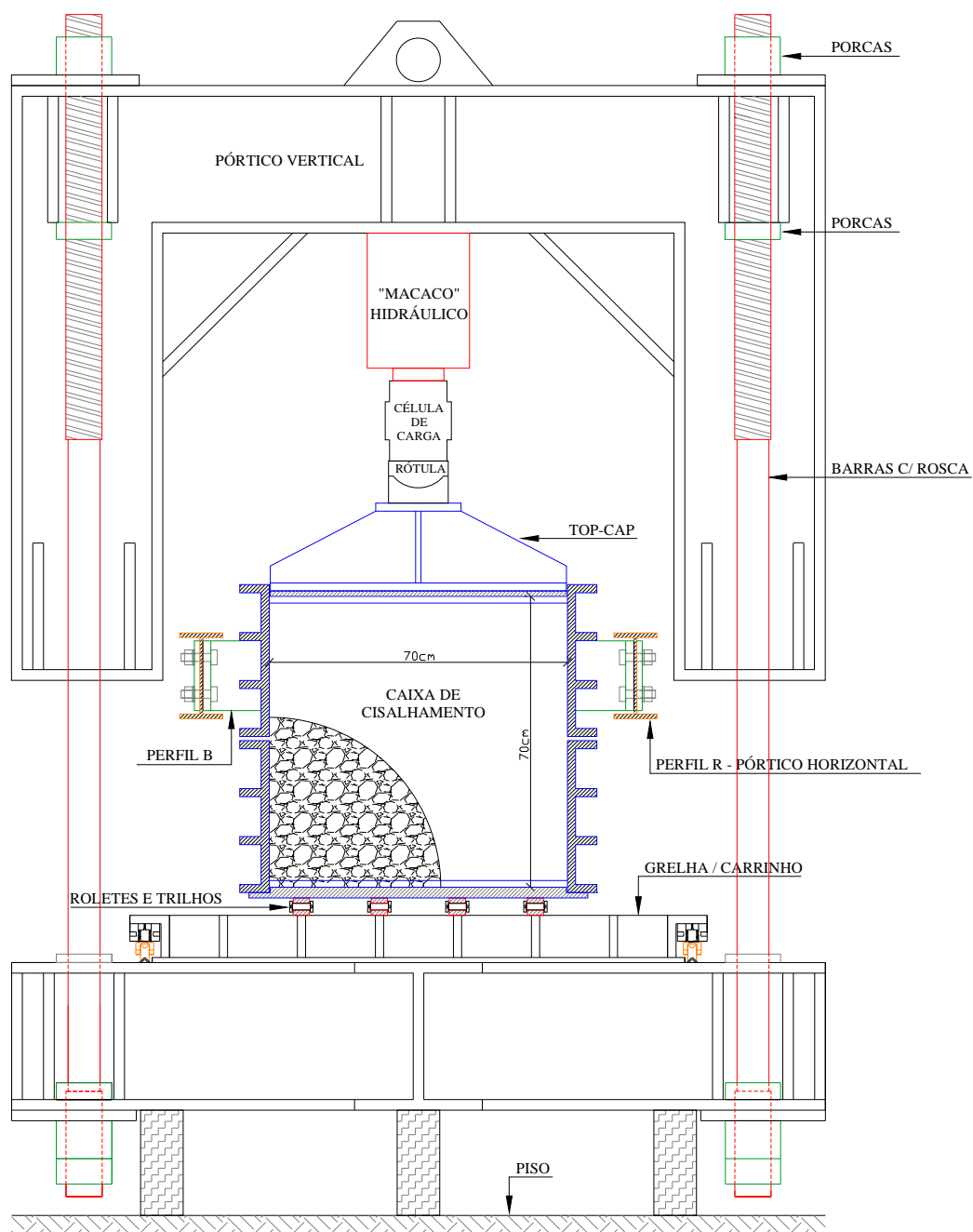


Figura 4.2 - Vista frontal do equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões

As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam fotos laterais e superiores do equipamento.



Figura 4.3 - Foto lateral do equipamento



Figura 4.4 - Foto superior do equipamento

#### 4.2.2. Caixa de cisalhamento

A caixa de cisalhamento tem formato cúbico, com dimensões internas úteis de 70cm × 70cm × 70cm. É dividida em duas partes, uma inferior e outra superior, ambas com 36cm de altura total. Suas paredes possuem 19,1mm de espessura e são reforçadas por barras enrijecedoras de mesma espessura e largura de 50mm.

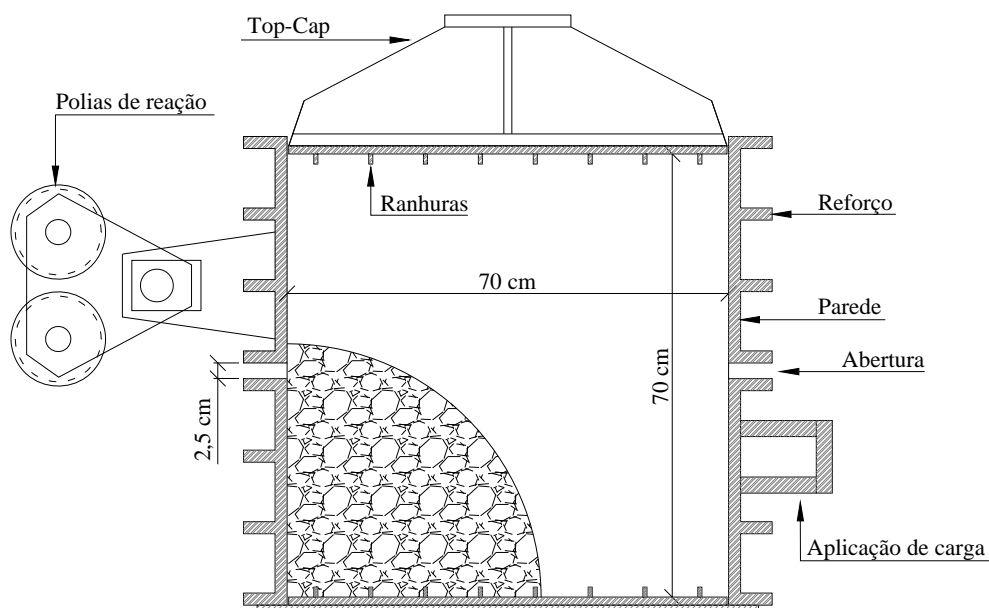


Figura 4.5 - Detalhe da caixa de cisalhamento

Entre as partes inferior e superior foi deixada uma abertura de 2,5cm, conforme indica a Figura 4.5. Segundo Maia (2001) o tamanho da abertura pode ter efeito no deslizamento e rolamento das partículas, o que se reflete nos resultados dos ensaios. Aberturas pequenas podem induzir ao cisalhamento das partículas, promovendo o aumento da resistência do material. A Figura 4.6 apresenta a abertura juntamente com os reforços das paredes.



Figura 4.6 – Detalhe da abertura entre caixas e dos reforços das paredes.

As placas horizontais situadas no topo e na base da caixa são providas de ranhuras, constituídas por barras retangulares soldadas, cuja função é impedir o deslizamento do corpo de prova durante o cisalhamento. Sobre a placa de topo é apoiado o *top-cap*. As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam a placa ranhurada de base e o *top-cap*, respectivamente.



Figura 4.7 - Placa ranhurada de base



Figura 4.8 - *Top-cap* do corpo de prova

Durante o estágio de cisalhamento, a caixa inferior, apoiada sobre roletes, é deslocada horizontalmente com velocidade constante por um atuador hidráulico. A caixa superior não se



desloca horizontalmente devido à reação de conjuntos de polias, que transferem os esforços gerados pelo atuador ao pórtico horizontal (ver item 4.2.3).

A lateral da caixa inferior onde o pistão do atuador hidráulico aplica o esforço cisalhante foi reforçada com chapas de 25,4mm de espessura, conforme indica a Figura 4.9. Os esforços ali aplicados, de até 500kN, acarretam momentos fletores elevados, necessitando o reforço.

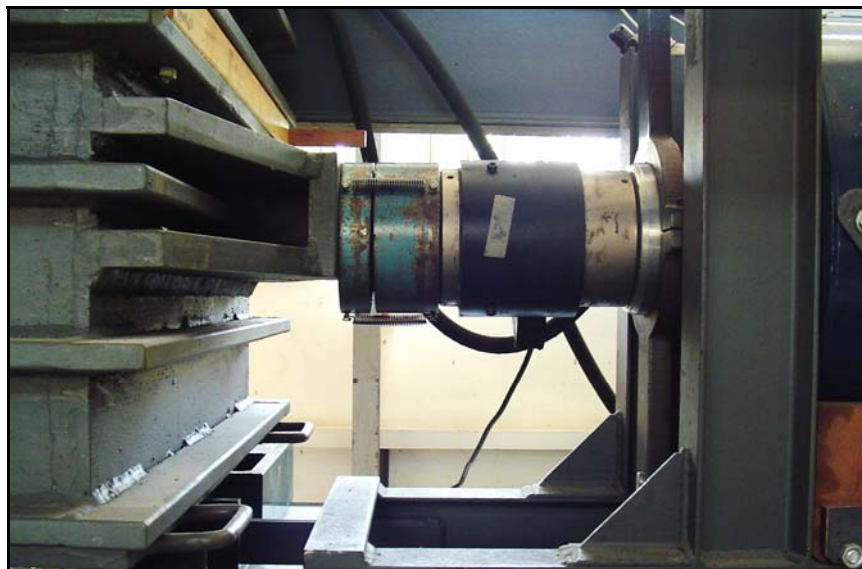


Figura 4.9 - Reforço para aplicação de carga

A caixa superior possui oito roletes, instalados nas laterais inferiores, que correm sobre a borda da caixa inferior, conforme mostrado na Figura 4.10. Seu objetivo é reduzir o atrito entre as duas caixas e, portanto, minimizar erros na medição dos esforços cisalhantes. Cada rolete é composto de dois mancais, soldados na caixa superior, por onde passa o eixo do rolete.



Figura 4.10 - Roletes entre caixas

#### 4.2.3. Polias e chapas de reação horizontal

Na parte frontal da caixa superior foram instalados dois conjuntos de polias de reação, cada um contendo duas polias e um eixo de rotação, conforme apresentado na Figura 4.11. Estes conjuntos possuem quatro funções:

1. Transferir a carga aplicada pelo atuador hidráulico, na caixa inferior, para o Perfil C, impedindo o deslocamento horizontal da caixa superior;
2. Permitir o deslocamento vertical da caixa superior no caso do corpo de prova tender a dilatar durante o cisalhamento;
3. Permitir a rotação da caixa superior;
4. Impedir o deslocamento transversal da caixa superior, em relação à direção do cisalhamento.

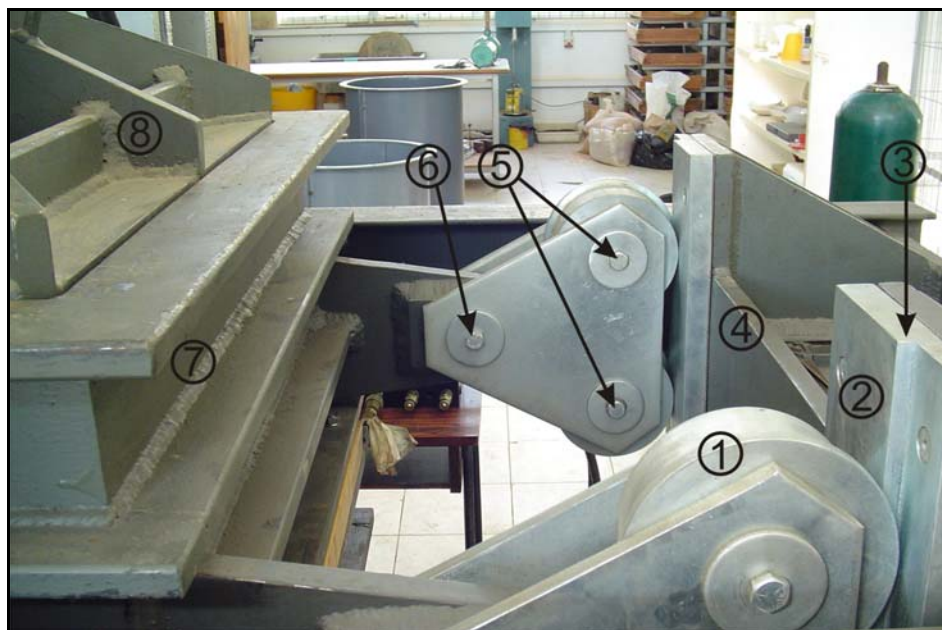


Figura 4.11 - Polias e chapas de reação horizontal

Os números da Figura 4.11 indicam: 1) polia, 2) chapa de reação, 3) ranhura da chapa, 4) perfil C, 5) eixos das polias que permitem deslocamento vertical da caixa superior, 6) eixo que permite a rotação da caixa superior, 7) caixa superior e 8) *top-cap*.

##### 4.2.3.1. Transferência de carga

A transferência de carga para o Perfil C ocorre diretamente pelo contato das polias com as chapas de reação. A área de contato entre estes dois elementos é muito pequena, já que o contato entre um cilindro (polia) e um plano (chapa) é, teoricamente, igual à linha geratriz do cilindro, cuja área é zero. Na prática nem as polias são perfeitamente cilíndricas nem a chapa perfeitamente plana e, além disso, os materiais que os compõe são elásticos. Disso decorre que,



uma vez aplicada carga, tanto polia como chapa se deformam, aumentando a área de contato, que é tanto maior quanto maiores forem as tensões de contato e menores os módulos de elasticidade dos materiais solicitados. Outros fatores também exercem influência, como os coeficientes de Poisson  $\mu$  dos materiais e os diâmetros e larguras das polias.

De qualquer forma, as tensões de contato são bastante elevadas. Os cálculos do dimensionamento das peças mostraram que, para os materiais adotados e as dimensões das polias e chapas, quando o equipamento estiver trabalhando na sua máxima capacidade de carga, de 500kN de esforço horizontal cisalhante, a tensão principal maior  $\sigma_1$  nos contatos polias-chapas será da ordem de 1100MPa. Este valor é muito superior a tensão de escoamento do aço comum (SAE 1020), da ordem de 250MPa.

O dimensionamento das peças foi realizado utilizando o critério de ruptura de von Mises, também conhecido como critério da máxima energia de distorção. Este leva em consideração as três tensões principais ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$ ) (Beer *et al*, 1992; Boresi *et al*, 1993). A determinação destas foi realizada seguindo o proposto por Boresi *et al* (1993) e Norton (1998).

Dada as tensões elevadas, foi necessário construir as peças com aço de alta resistência mecânica (SAE 4140), cuja tensão de escoamento é de 655MPa, suficiente para suportar as tensões atuantes, dentro do regime elástico dos materiais.

#### **4.2.3.2. Deslocamento vertical**

Durante o cisalhamento o corpo de prova deve ter liberdade para dilatar. Neste caso, o atrito com as paredes internas da caixa superior pode fazer com que esta se desloque para cima, deixando de manter contato com a borda da caixa inferior.

O conjunto de polias de reação foi projetado para permitir o deslocamento vertical da caixa superior. Ele corre livremente sobre a chapa de reação e aceita deslocamento ascendente máximo de 15 centímetros, o que representa 21% da altura do corpo de prova.

#### **4.2.3.3. Rotação**

Em muitos casos, nos ensaios de cisalhamento direto, verifica-se a tendência da parte do corpo de prova situada próxima ao ponto de aplicação de carga reduzir de volume e da parte próxima à reação aumentar de volume. Em decorrência disso e do atrito existente entre o corpo de prova e as paredes internas da caixa, tende a ocorrer uma rotação da caixa superior, isto é, um deslocamento vertical relativo entre face próxima ao ponto de aplicação de carga e a face próxima à reação.

Outro fenômeno que também tende ocasionar a rotação da caixa superior é o surgimento de momentos fletores devido ao não alinhamento do esforço aplicado pelo atuador hidráulico com a reação das polias. Procurou-se minimizar esses momentos diminuindo a excentricidade, o que foi obtido projetando-se a aplicação de carga no centro da metade superior da caixa inferior e a reação no centro da metade inferior da caixa superior.

O equipamento foi projetado para permitir a rotação da caixa superior, citada anteriormente. Isso é garantido por dois eixos que ligam as chapas de extensão da caixa aos conjuntos de polias de reação (ver Figura 4.11).

#### **4.2.3.4. Deslocamento transversal**

Foi identificada a possibilidade tanto da caixa superior como da inferior se deslocar transversalmente ao eixo de aplicação de carga horizontal, durante a etapa de cisalhamento, devido à heterogeneidade dos corpos de prova. Sobre a solução dada à caixa inferior ver item 4.2.4.

Para a caixa superior, o alinhamento é garantido por “dentes” existentes nas polias, que correm sobre “rebaixos” das chapas de reação, conforme indicado na Figura 4.11. O sistema funciona como trilhos de trem, onde as rodas de uma lateral impedem o deslocamento para um lado enquanto as rodas da outra lateral não deixam o vagão se deslocar para o outro lado.

#### **4.2.4. Conjuntos de trilhos**

A caixa inferior está apoiada sobre quatro conjuntos de trilhos e roletes. Estes se situam entre a base da caixa e a grelha da plataforma, conforme indicado nas Figuras 4.1 e 4.2, anteriores, e Figura 4.12, a seguir. Eles possuem as seguintes funções:

1. Reduzir as forças de atrito contrárias ao deslocamento horizontal;
2. Impedir o deslocamento transversal da caixa inferior.



Figura 4.12 - Trilhos e roletes inferiores

#### **4.2.4.1. Redução da forças de atrito**

O deslocamento longitudinal da caixa inferior deve ocorrer com o menor atrito possível. Uma vez que a carga aplicada é medida junto ao pistão do atuador hidráulico, qualquer perda de carga por atrito leva à majoração dos esforços cisalhantes atuantes no plano de cisalhamento.

Cada conjunto de trilhos é composto por dois trilhos, um superior e outro inferior, e um carrinho de deslizamento, composto por roletes e chapas laterais de amarração.

Ambos os trilhos possuem 12,7mm de espessura e 38,1mm de largura. O comprimento do superior é de 750mm e do inferior 960mm. Enquanto este último está parafusado na grelha, o primeiro está soldado na chapa que forma o fundo da caixa de cisalhamento.

Cada um dos quatro carrinhos de deslizamento possui 25 roletes, de 15,8mm de diâmetro, que são unidos lateralmente por duas chapas de aço perfuradas.

O sistema funciona da seguinte forma: inicialmente o carrinho é posicionado entre os trilhos inferior e superior; à medida que a caixa inferior é deslocada, os roletes rolam entre os trilhos; a chapa lateral garante o espaçamento entre roletes, impedindo que eles encostem uns nos outros.

Devido às elevadas cargas verticais, as tensões de contato rolete - trilho também são elevadas. Por isso, os dois elementos foram construídos em aço SAE 1045, de maior resistência mecânica.

Devido às forças de atrito entre o corpo de prova e a parede interna da caixa de cisalhamento, os dois conjuntos de trilhos próximos às laterais sofrem, provavelmente, maior esforço do que os outros dois posicionados na região central.

#### **4.2.4.2. Deslocamento transversal**

Conforme anteriormente citado, foi identificada a possibilidade da caixa inferior se deslocar transversalmente à direção do cisalhamento. Para evitar isto, as chapas laterais de cada carrinho de deslizamento tiveram suas espessuras aumentadas para 9,5mm e foram unidas transversalmente por cinco parafusos de 12,7mm. Estas chapas correm lateralmente aos trilhos inferior e superior. Caso a caixa tenda a se deslocar transversalmente, os trilhos superiores serão restringidos pelas chapas laterais. O esforço será transmitido aos trilhos inferiores, que estão parafusados na grelha. Esta, por sua vez, suportará os esforços.

#### 4.2.5. Pórtico horizontal

O pórtico de reação horizontal teve de ser inteiramente construído, diferentemente do pórtico vertical, que já existia. Ele foi adaptado na plataforma já existente.

Sucintamente, o pórtico é composto por duas peças na forma de “T”, compostas pelos perfis A, B, C e D, parafusadas nas extremidades longitudinais da plataforma e ligadas por dois Perfis R, também por meio de parafusos, conforme indicam as Figuras 4.1 e 4.2, anteriores. Os Perfis R atravessam todo o comprimento da plataforma, passando ao lado da caixa de cisalhamento.

A peça T1 recebe carga do atuador hidráulico nela parafusado, enquanto a peça T2 recebe os esforços de reação da caixa superior. O atuador fica excêntrico ao pórtico horizontal, apoiado na parte vertical da peça T1, causando momentos fletores elevados. As peças “T” suportam momentos fletores e esforços cortantes, enquanto os Perfis R são solicitados principalmente à tração.

A plataforma e pórtico vertical são utilizados também para ensaios de compressão unidimensional e, futuramente, ensaios triaxiais, ambos de grandes dimensões. Portanto, foi necessário construir pórtico horizontal de modo a não inviabilizar a execução dos referidos ensaios. Por isso, as peças que o compõe tiveram de ser unidas por ligações parafusadas em vez de soldadas.

#### 4.2.6. Aplicação de carga

##### 4.2.6.1. Esforço vertical de consolidação

A tensão normal ao plano de cisalhamento foi aplicada por meio de um “macaco” hidráulico acionado por uma bomba de óleo elétrica e controlado manualmente por meio de válvulas direcionais. Sua capacidade de carga é de cerca de 1000kN, com curso máximo do pistão de 170mm, o que representa 24,3% da altura do corpo de prova. Uma célula de carga com capacidade de 500kN, posicionada entre o pistão e o *top-cap*, foi utilizada para medir o esforço aplicado. Também foi utilizada uma rótula para permitir a rotação do *top-cap*. A Figura 4.13 apresenta o sistema.



Figura 4.13 - Aplicação do esforço vertical

#### 4.2.6.2. Esforço horizontal cisalhante

A aplicação do esforço cisalhante foi realizada pelo já citado atuador hidráulico. Este possui capacidade de carga de 1960 kN e curso máximo de 220mm, o que representa deformação cisalhante de 31%. Ele foi fixado no Perfil A por meio de parafusos. O Perfil A teve de ser reforçado em suas abas para evitar deformações plásticas devido as cargas concentradas de até 500kN. A Figura 4.14 apresenta o atuador em sua posição de ensaio.

O atuador é acionado por bomba de óleo e controlado por servo-válvula, via computador. Nos ensaios foi utilizado controle de deslocamento do pistão, com velocidade constante de avanço.

A medição dos deslocamentos do pistão foi realizada por transdutor de deslocamento do próprio atuador. A medição do esforço cisalhante transmitido ao corpo de prova foi realizada por meio de célula de carga com capacidade para 500kN, fixada no pistão. Entre a célula de carga e a caixa de cisalhamento posicionou-se uma rótula para permitir eventuais desalinhamentos da caixa.

As dificuldades referentes à retirada do atuador de sua posição vertical (parafusado no pórtico vertical), onde é utilizado em ensaios de compressão unidimensional, e instalação na posição horizontal, isto é, parafusado no Perfil A, foram solucionadas por meio da construção de

um suporte metálico. Este possui uma extremidade rotulada que permite movimentação do atuador da posição vertical para a horizontal e vice-versa.



Figura 4.14 – Vista superior do atuador hidráulico servo-controlado, fixado no Perfil A

### 4.3. ENSAIO EXPLORATÓRIO

#### 4.3.1. Introdução

Após a montagem do equipamento ter sido concluída, foi realizado um ensaio exploratório com objetivo de avaliar o desempenho do mesmo. O material utilizado foi brita de granito, não compactada. Inicialmente o corpo de prova foi consolidado e em seguida cisalhado.

#### 4.3.2. Estágio de consolidação

A tensão de consolidação adotada foi de 715kPa, correspondente à força vertical de 350kN. À medida que o corpo de prova se deformava ocorria perda de carga, tornando necessária a abertura manual da válvula direcional para avançar o pistão do “macaco” hidráulico para manter a carga constante. A Figura 4.15 apresenta a variação da tensão normal total com o tempo. A

denominação “total” deve-se ao não desconto das forças de atrito surgidas entre o corpo de prova e as paredes internas da caixa de cisalhamento. O equipamento não permite a determinação dessas forças.

O controle manual resultou em variação máxima da tensão normal total de 7,2% em relação aos 715kPa estipulados.

O tempo total do estágio de consolidação foi de 27 minutos. Após 7 minutos as deformações verticais do corpo de prova já haviam praticamente estabilizado, como demonstra a Figura 4.15. Deixou-se a carga atuando por mais de 7 minutos com o objetivo testar o sistema como um todo.

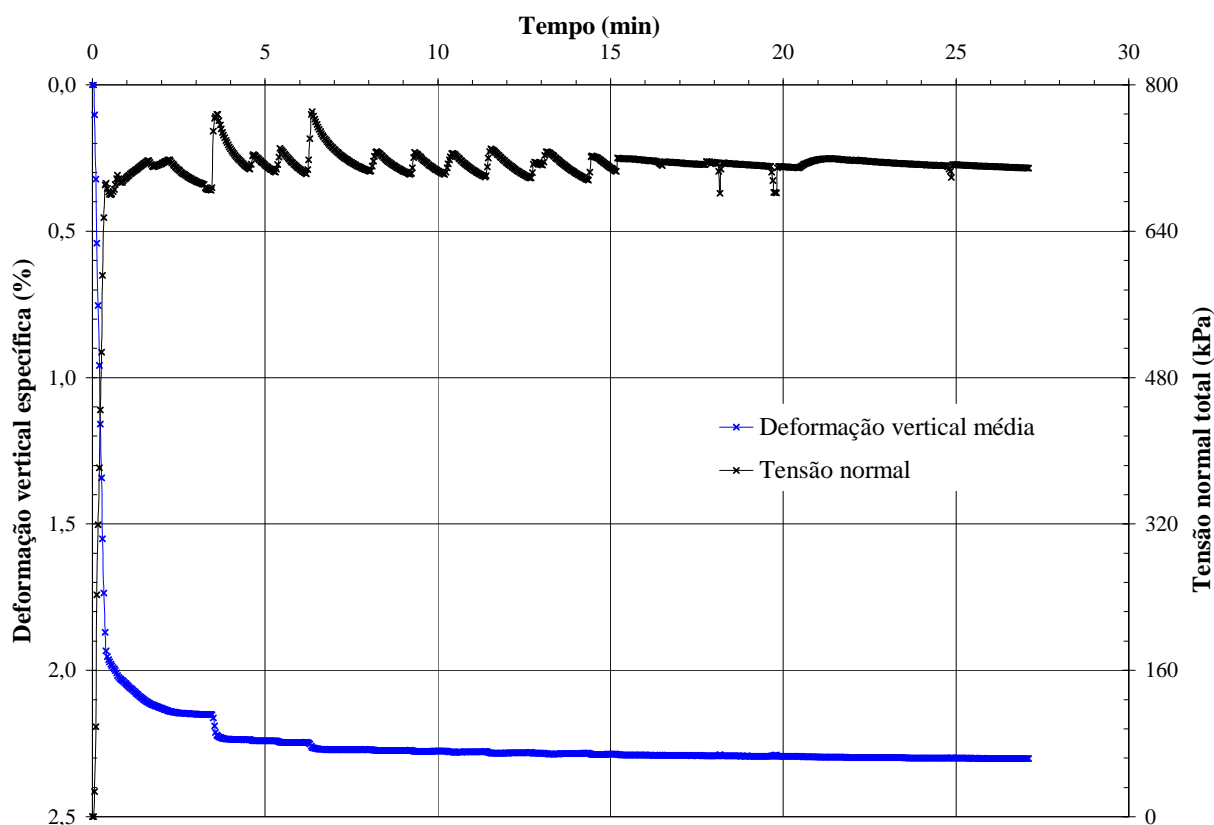


Figura 4.15 - Ensaio exploratório: tensão normal e deformação vertical específica na consolidação

As deformações verticais médias correspondem à média de três transdutores de deslocamento instalados no *top-cap*. Deformações positivas indicam diminuição de volume do corpo de prova. Os aumentos bruscos de deformação vertical são decorrentes de aumentos da tensão normal.

### 4.3.3. Estágio de cisalhamento

Depois de estabilizadas as deformações verticais, foi iniciado o cisalhamento do corpo de prova. Foi utilizada velocidade cisalhante constante de 2,0mm/min.

O controle de avanço do pistão do atuador hidráulico apresentou desempenho muito bom, como demonstra a Figura 4.16, que indica o deslocamento do pistão em função do tempo. Admitiu-se que deslocamento relativo entre as partes inferior e superior da caixa de cisalhamento era igual ao deslocamento do pistão, o que é bastante razoável. Isto é, não foram levadas em consideração eventuais acomodações, folgas e deformações do equipamento.

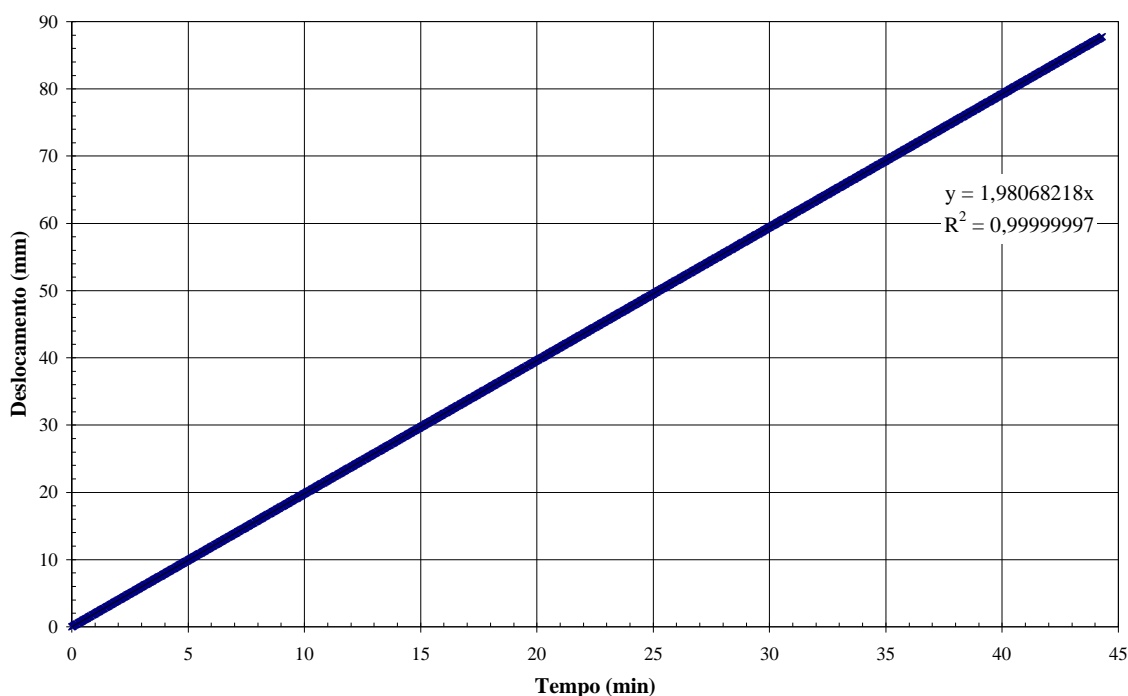


Figura 4.16 - Ensaio exploratório: deslocamento do pistão horizontal em função do tempo

Observou-se pequena diferença entre a velocidade programada (2,0mm/min) e a velocidade medida (1,981mm/min) de 0,95%. A velocidade adotada para os cálculos dos ensaios definitivos foi sempre a medida pelo sistema de aquisição de dados (Spider 8, da HBM). A Figura 4.17 apresenta as curvas de tensão cisalhante e tensão normal total em função do deslocamento horizontal e da deformação cisalhante, durante a etapa de cisalhamento.



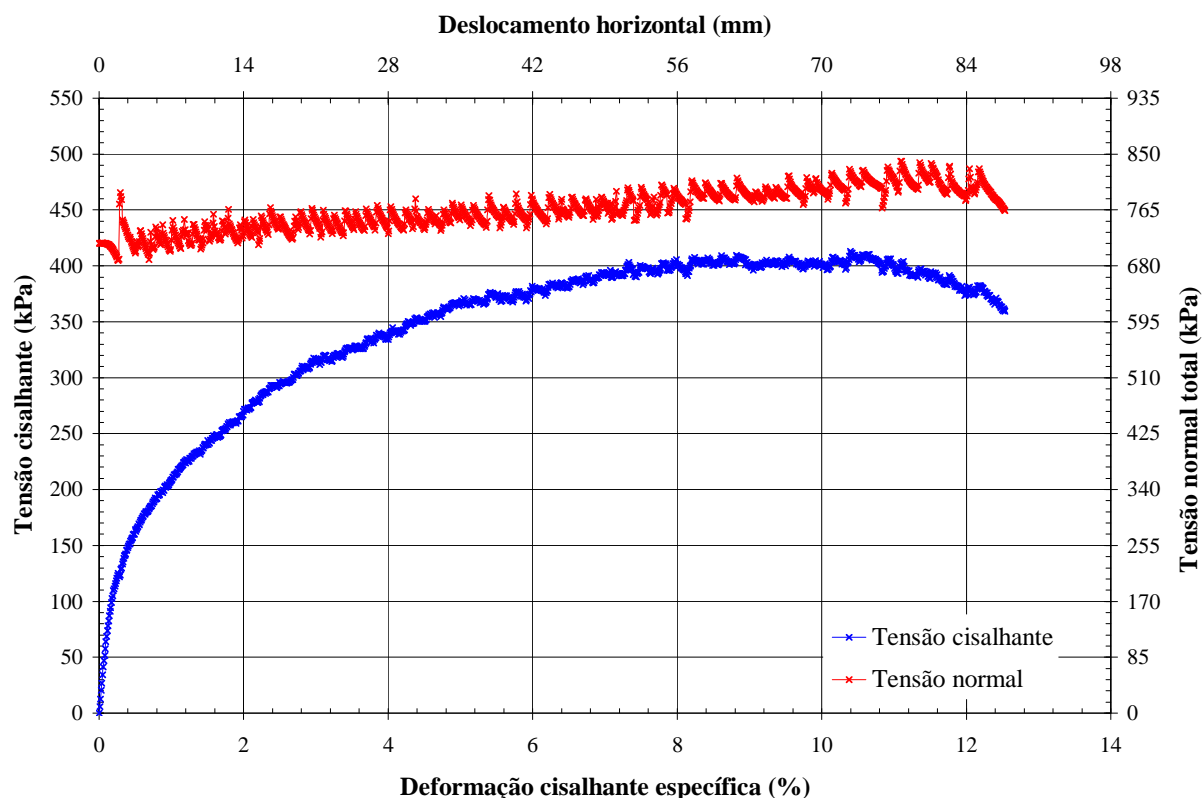


Figura 4.17 - Ensaio exploratório: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante vs tensão normal total

Nota-se que a tensão normal total apresentou oscilação e aumento com a deformação cisalhante. A oscilação é decorrente do controle manual da carga vertical, como já citado, e o aumento de tensão média deve-se à redução da área do plano de cisalhamento durante o ensaio. A redução da força vertical para compensar a diminuição da área seria exequível, mas difícil devido ao controle manual. Uma solução para o problema seria a utilização de servo-válvula com controle computacional, semelhante a existente no atuador hidráulico horizontal.

As deformações verticais medidas em cada um dos três transdutores de deslocamento instalados no *top-cap* estão apresentadas na Figura 4.18. Nota-se que a redução de volume do corpo de prova foi muito maior na região do transdutor 3, localizado próximo do ponto de aplicação de carga pelo atuador hidráulico. Já na região próxima das polias de reação, representada pelos transdutores 1 e 2, a redução de volume foi bem menor.

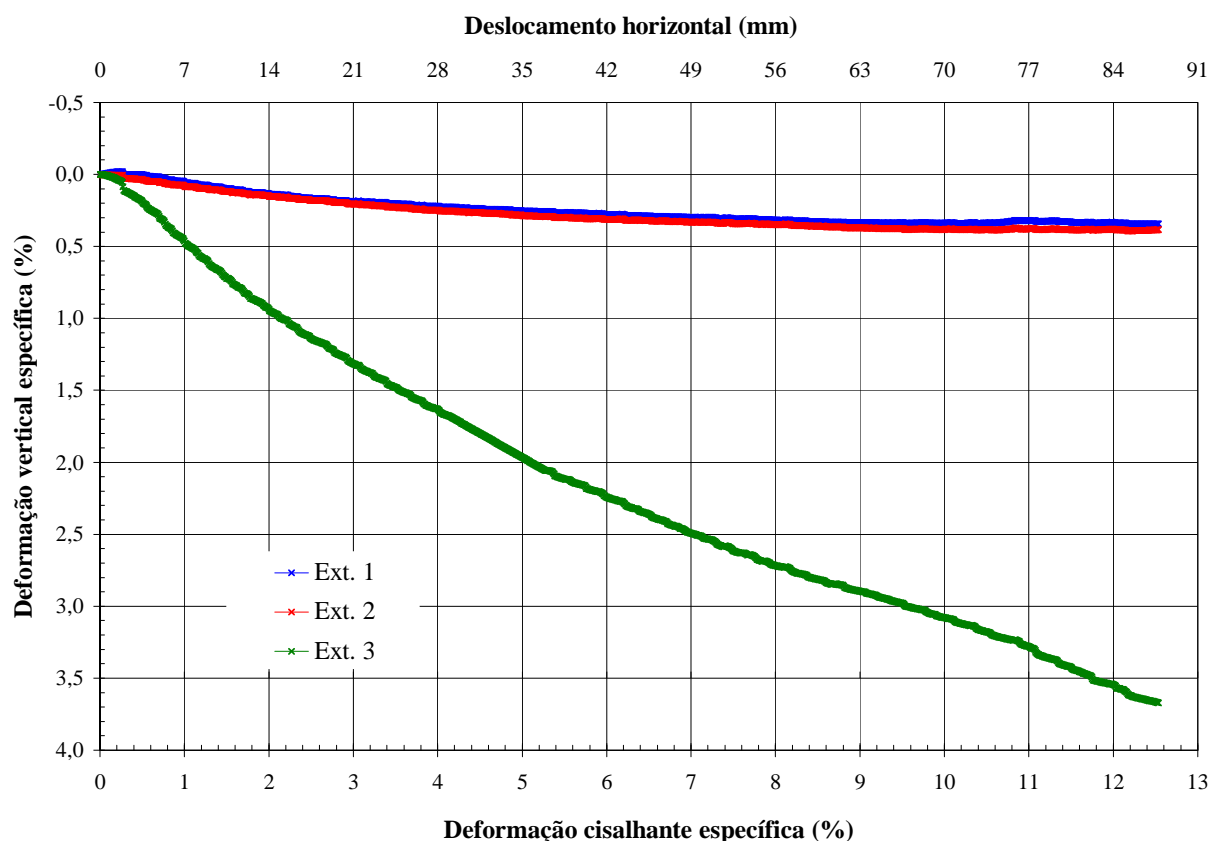


Figura 4.18 - Ensaio exploratório: deformações verticais específicas para cada transdutor de deslocamento

Depois de concluído o ensaio, ao se retirar o corpo de prova da caixa de cisalhamento, notou-se que as partículas de brita “marcaram” mais intensamente as paredes da caixa perto da região mais comprimida, isto é, abaixo do transdutor 3, como pode-se observar na Figura 4.19 (à direita da figura).

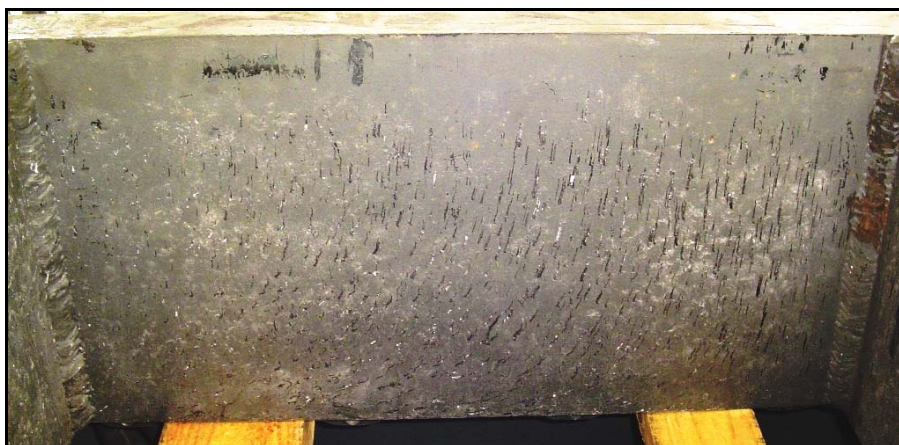


Figura 4.19 - Ensaio exploratório: paredes laterais internas da parte superior da caixa de cisalhamento

As marcas da Figura 4.19 indicam que: a) as partículas perto das polias se deslocaram pouco; b) as partículas próximas ao ponto de aplicação de carga se deslocaram bastante, preponderantemente na direção vertical e c) as partículas da região central da caixa tiveram deslocamento tanto vertical como horizontal.

A Figura 4.20 apresenta as variações de deformação vertical média e de ângulo de rotação do *top-cap* durante o cisalhamento.

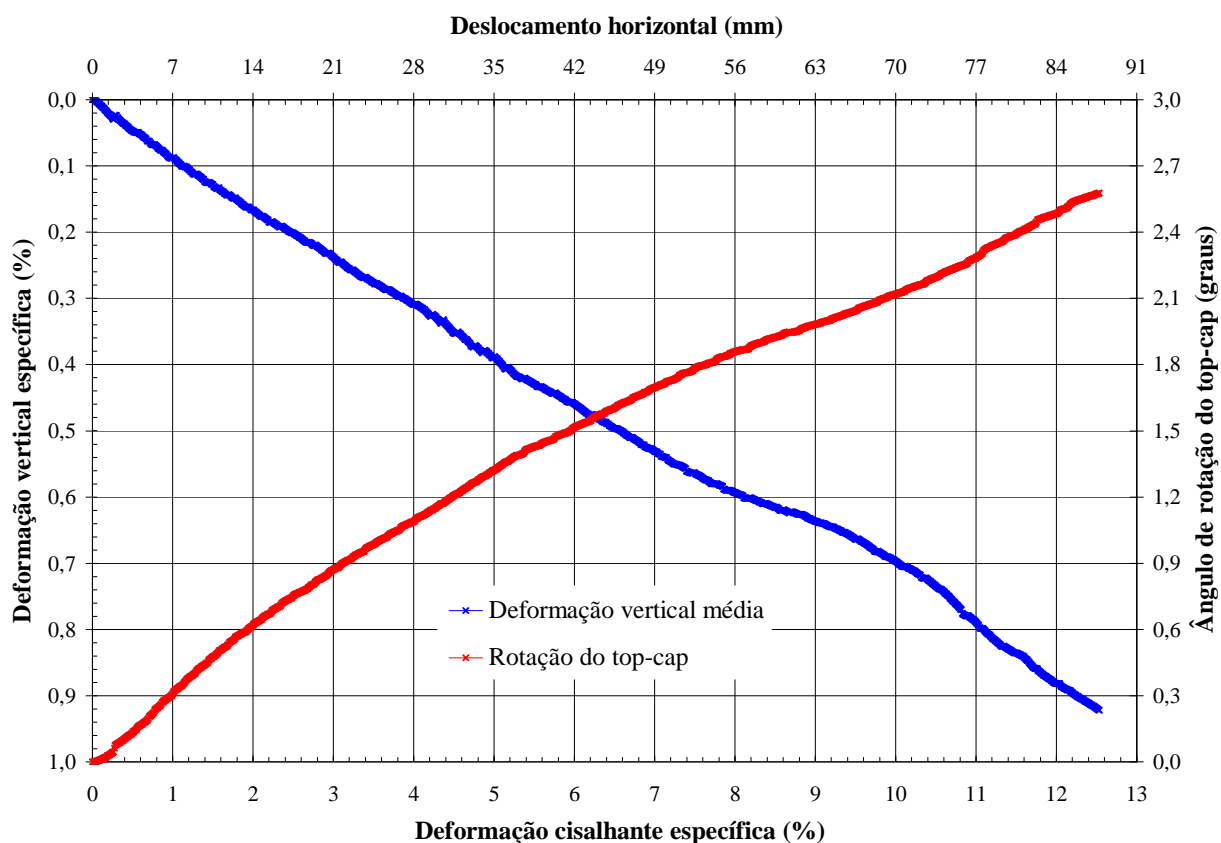


Figura 4.20 - Ensaio exploratório: deformação cisalhante específica vs deformação vertical específica média vs ângulo de rotação do *top-cap*

#### 4.3.4. Avaliação do equipamento

O desempenho do equipamento com um todo foi bastante satisfatório, embora tenham sido identificados alguns problemas de fácil solução.

Os pórticos vertical e horizontal suportaram as cargas aplicadas de 350kN e 180kN, respectivamente. O atuador hidráulico apresentou controle de velocidade de cisalhamento bastante satisfatório, mesmo com carga aplicada (180kN). A caixa de cisalhamento e as polias de reação não apresentaram problemas.

Como já citado, o sistema hidráulico utilizado para aplicação da tensão normal possui sensibilidade apenas razoável, decorrente tanto das características do equipamento como de sua operação. Espera-se para os ensaios definitivos oscilação da carga da ordem de 5%. Acredita-se que isto não venha a comprometer os resultados.

Durante o estágio de cisalhamento o *top-cap* “travou” na caixa superior devido à rotação que sofreu, o que não foi previsto durante o projeto do equipamento. Por isto teve de sofrer alguns ajustes para que isso não mais ocorresse.

A instrumentação, composta por quatro transdutores de deslocamento e duas células de carga, e o sistema de aquisição de dados não apresentaram problemas.

## CAPÍTULO 5 – MATERIAIS DE ESTUDO

### 5.1. INTRODUÇÃO

A determinação da resistência ao cisalhamento e da compressibilidade foi realizada para rejeitos das duas principais camadas de carvão exploradas na bacia carbonífera catarinense, a saber, Barro Branco e Bonito. Os rejeitos foram coletados na saída dos lavadores das minas Cooperminas e Barro Branco, que exploram camadas de carvão Barro Branco e Bonito, respectivamente (não confundir: a Mina Barro Branco explora a camada Bonito).

A Mina Cooperminas localiza-se no município de Forquilha-SC, distante cerca de 15km do centro urbano de Criciúma, na direção sudoeste. Já a Mina Barro Branco, de propriedade da Indústria Carbonífera Rio Deserto Ltda., situa-se na localidade de Itanema, município de Lauro Muller-SC, distante cerca de 50km de Criciúma. A Figura 5.1 indica a localização aproximada das minas, em relação aos municípios do litoral sul catarinense.

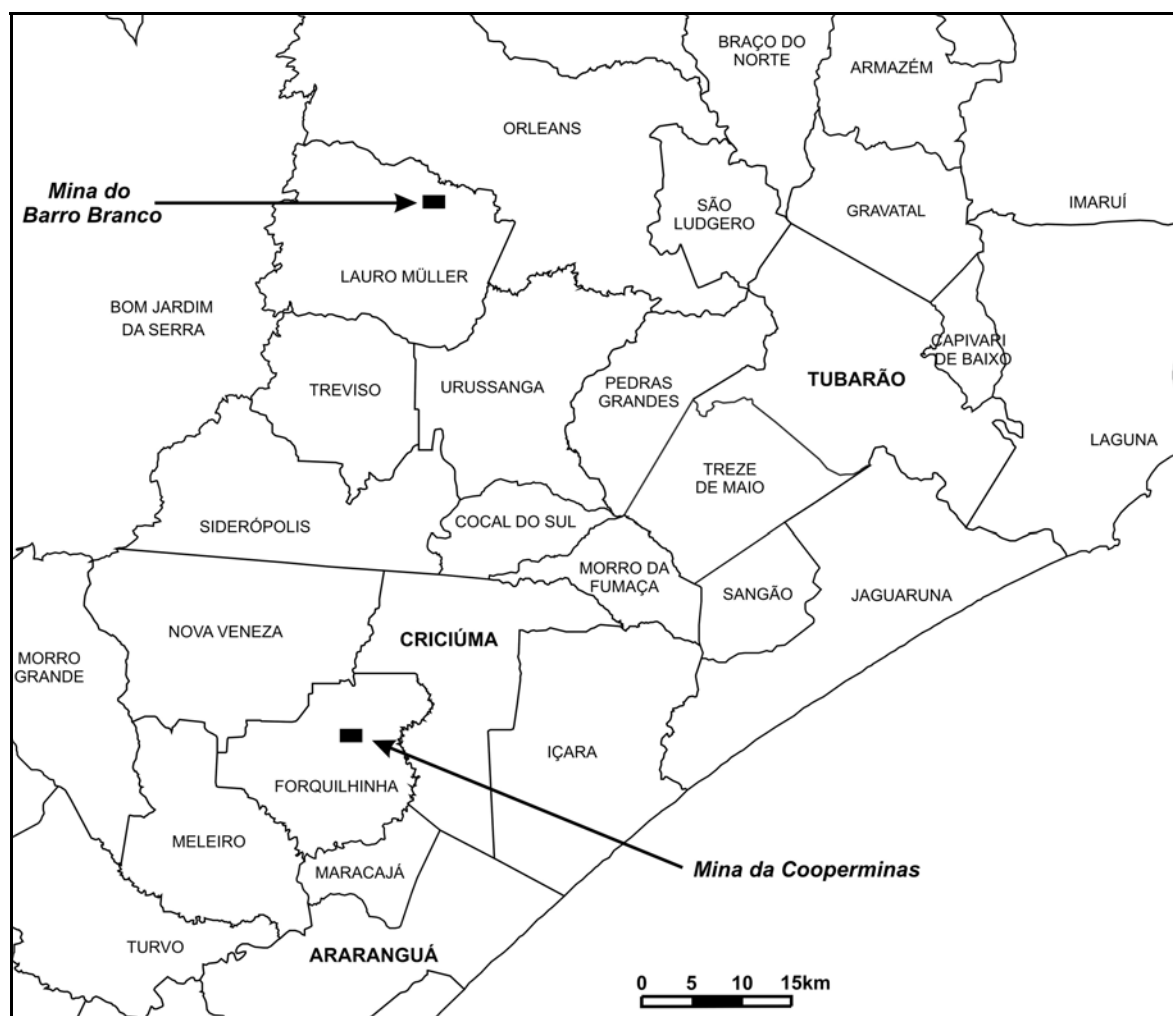


Figura 5.1 - Localização da minas estudadas

Os rejeitos coletados para a presente pesquisa eram de produção recente, também conhecidos por rejeitos “verdes”. Isso garantiu que não estivessem alterados físico-quimicamente, o que poderia ocorrer no caso de coleta em depósito, já que os rejeitos são bastante susceptíveis à alteração, conforme já citado.

Tanto a Mina Cooperminas como a Mina Barro Branco possuem exclusivamente lavra subterrânea e utilizam o método de câmaras e pilares. A retirada do carvão bruto ROM ocorre por meio de correias transportadoras que chegam à superfície por um único acesso, denominado emboque. Os pátios de beneficiamento do ROM de ambas as minas ficam localizados nas imediações do emboque. Assim com as demais minas da região, o carvão lavrado e beneficiado nas duas minas é utilizado no complexo termelétrico Jorge Lacerda, em Capivari de Baixo-SC.

## 5.2. REJEITOS BARRO BRANCO

A Mina Cooperminas processa em média 20.000 toneladas mensais de ROM, com recuperação, em massa, de aproximadamente 39% de carvão granulado e 4% de finos, totalizando 43% (Redivo, 2001). Portanto, os 57% restantes do ROM são rejeitos, o que significa 11.400 toneladas mensais.

A Figura 5.2 apresenta uma foto do depósito de rejeitos da Cooperminas. À esquerda percebe-se pequena parte das instalações do pátio de beneficiamento e à direita um trator de esteira espalhando o rejeito depositado por caminhões basculante.



Figura 5.2 - Pátio de beneficiamento e depósito de rejeitos da Mina Cooperminas

No jigge ocorre a separação dos rejeitos em  $R_1$  e  $R_2$ , o que não é usual no beneficiamento da camada Barro Branco, que geralmente conta também com a fração  $R_3$ . Isso ocorre devido ao tipo de equipamento utilizado ou à regulagem do mesmo.

Do jigge, as frações  $R_1$  e  $R_2$  são encaminhadas para um único silo. Do silo os rejeitos são transportados para o depósito, com as duas frações misturadas.

### 5.2.1. Depósitos de rejeitos

Nos depósitos os rejeitos são espalhados por tratores de esteira em camadas de 30 a 60 centímetros. A compactação em geral é precária, sem a utilização de rolos compactadores. Ela é realizada por meio dos tratores de esteira e dos caminhões basculante. Usualmente procura-se fazer com que estes últimos circulem nos locais onde os rejeitos estão mais fofos, com o objetivo de compactá-los. Além disso, a movimentação dos tratores colaboram na densificação do material. Todavia, em alguns locais é praticada ponta de aterro.

Não existe controle de campo para verificação da densidade relativa do material em depósito. Ensaio geotécnicos para caracterização física e mecânica dos rejeitos são raros. Também não há instrumentação para avaliar recalques ou outra variável geotécnica.

O depósito de rejeitos ocupa área de aproximadamente 50 hectares, dos quais cerca de 17 hectares estão abandonados (JICA, 1998). Em alguns locais o ambiente está bastante degradado, como pode ser observado na Figura 5.3, já apresentada anteriormente. À direita passa um córrego que recebe continuamente contaminantes ácidos e metais pesados.



Figura 5.3 - Setor abandonado do depósito da Mina Cooperminas (dezembro de 2005)



### 5.3. REJEITOS BONITO

Os rejeitos Bonito foram coletados na Mina Barro Branco, de propriedade da Indústria Carbonífera Rio Deserto Ltda. A lavra é subterrânea e teve início no ano de 1999 . A Figura 5.4 apresenta o pátio de beneficiamento de ROM.



Figura 5.4 - Pátio de beneficiamento de ROM da Mina Barro Branco

Essa mina beneficia cerca de 70.000 toneladas mensais de ROM. A recuperação é de 50% de carvão granulado e 4% de finos, aproximadamente, totalizando 54% (Redivo, 2002). Os 46% restantes do ROM são rejeitos. Isso significa a geração de 32.200 toneladas de rejeito por mês.

No jigge os rejeitos são divididos em  $R_1$  e  $R_2$ , que são encaminhados para dois silos independentes. As duas frações são transportadas para o depósito, por caminhões basculante, e lá depositadas.

#### 5.3.1. Depósito de rejeitos

O depósito de rejeitos se localiza a cerca de 2 km do pátio de beneficiamento. Ele foi construído numa área já minerada a céu-aberto pela antiga companhia Treviso S/A. Esta utilizou uma *drag-line* Marion para retirar a cobertura de solo e rocha e assim ter acesso à camada de carvão, deixando grandes cavas no local. Algumas destas cavas estão sendo preenchidas pelos rejeitos da mina em questão. A Figura 5.5 apresenta uma ortofotocarta do depósito e de parte das instalações do pátio de beneficiamento.





Figura 5.5 - Ortofotocarta da área do depósito e do pátio de beneficiamento da Mina Barro Branco

Na parte central da Figura 5.5 observa-se algumas cavas contendo água acumulada. Parte delas são utilizadas como lagoas de decantação de efluente dos lavadores. A Figura 5.6 apresenta uma vista geral do depósito.



Figura 5.6 - Depósito de rejeitos da Mina Barro Branco

Os rejeitos são espalhados por tratores de esteira em camadas de 30 a 50 centímetros. Para compactação não são usados rolos compactadores, mas os próprios tratores. Os caminhões também ajudam na densificação. As características do depósito não permitem práticas de ponta-de-aterro, já que ele é uma antiga cava de mineração. Todavia, nota-se que na periferia os rejeitos ficam mais fofos do que na região central, o que se explica pela maior circulação de caminhões nesta última.

Controles tecnológicos de compactação são raros, bem como ensaios de caracterização física e mecânica dos rejeitos.

#### **5.4. COLETA DE AMOSTRAS**

As amostras tanto de rejeito Barro Branco como de Bonito foram coletadas diretamente nos silos que ficam ao lado dos jiques. Para realização dos ensaios de caracterização e de compressão unidimensional foram encaminhados ao laboratório cerca de 1.600kg de cada tipo de rejeito. Para os ensaios de cisalhamento direto foram necessários 3.000kg de rejeito Barro Branco.

No caso do rejeito Barro Branco, o jique da Mina Cooperminas encaminhava as frações  $R_1$  e  $R_2$  para um mesmo silo, não sendo possível coleta-las separadamente. Portanto, o material amostrado e enviado ao laboratório já era uma mistura das duas frações.

Já para dos rejeitos Bonito, oriundos da Mina Barro Branco, as frações  $R_1$  e  $R_2$  eram, do jique, encaminhadas para dois silos independentes. Por isso elas foram coletadas e encaminhadas para o laboratório separadamente. Ali foram misturadas na mesma proporção em que eram produzidas, de 60 e 40% para  $R_1$  e  $R_2$ , respectivamente.

## CAPÍTULO 6 – PROGRAMA E PROCEDIMENTOS DE ENSAIOS

### 6.1. INTRODUÇÃO

Os ensaios realizados para a presente pesquisa se dividem em duas categorias: de campo e de laboratório. Em campo foram determinadas as massas específicas aparentes secas dos rejeitos em depósito. Os ensaios de laboratório se subdividem em ensaios de caracterização e mecânicos. As páginas seguintes apresentam os tipos ensaios executados e as respectivas metodologias adotadas. Atenção especial é dada aos ensaios de compressão unidimensional e de cisalhamento direto de grandes dimensões. Também são apresentadas as principais considerações de cálculo adotadas para os ensaios mecânicos.

### 6.2. ENSAIOS DE CAMPO

#### 6.2.1. Massa específica aparente

Para avaliação do comportamento mecânico dos rejeitos, tal como eles são atualmente depositados em campo, foi necessário determinar a massa específica aparente seca dos materiais em depósitos atualmente em operação. Para tanto foram realizados ensaios *in situ* nos depósitos das duas minas estudadas, apresentados no Capítulo 5.

Após concluídos os serviços de espalhamento e compactação de uma camada de rejeito, foram abertas pequenas cavas em formato cilíndrico de, aproximadamente, 21 cm de diâmetro e 24 cm de profundidade, para determinação da massa específica aparente seca, conforme indicado a Figura 6.1.



Figura 6.1 - Abertura de cavas em camada de rejeitos espalhada



O material retirado das cavas foi cuidadosamente armazenado em sacos plásticos e encaminhados para laboratório, onde foi determinada sua massa, teor de umidade e massa específica das partículas. A massa de material escavado variou entre 11,2 e 16,7kg.

Para a determinação do volume, a cava foi revestida por duas camadas de película plástica transparente, conforme indica da Figura 6.2. Após, a cava foi preenchida com água. O uso da película dupla objetivou evitar vazamentos. O volume de água necessário para preencher a cava foi determinado com auxílio de proveta de 1000cm<sup>3</sup>, graduada a cada 10cm<sup>3</sup>. Os volumes medidos variaram entre 7500 e 9000cm<sup>3</sup>.



Figura 6.2 - Determinação do volume da cava

As escavações foram realizadas manualmente, com auxílio de enxada, picareta e pá-de-mão. Com o objetivo de obter maior representatividade do ensaio, antes da escavação tomou-se o cuidado de retirar os primeiros 5 a 10 centímetros de material para depois executar a cava. Desse modo, o material ensaiado foi o da porção central da camada.

Em cada depósito foram executados três ensaios. Foram escolhidos locais tanto da região central dos depósitos como da periferia, onde geralmente os rejeitos se encontravam mais fofos.

A partir da determinação em laboratório das massas escavadas e dos teores de umidade, foi possível calcular a massas específicas aparentes secas  $\gamma_s$ . A realização de ensaios de massa específica das partículas  $\gamma_g$  para o rejeito de cada cava permitiu calcular os índices de vazios  $e$ .

Acredita-se que o índice de vazios é o parâmetro mais adequado para avaliar o grau de compactidade dos rejeitos. Isto porque os valores de  $\gamma_s$  podem ser mascarados pela grande variação existente no  $\gamma_g$ , decorrente da distribuição aleatória de nódulos de pirita, cuja massa

específica é de 3,5g/cm<sup>3</sup>, e de carvão, cuja massa específica é de 1,4 g/cm<sup>3</sup>, aproximadamente. Essa variação tornou necessária a determinação de  $\gamma_g$  para o rejeito retirado de cada cava.

### **6.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO**

#### **6.3.1. Análise granulométrica**

As análises granulométricas dos rejeitos, tanto das amostras intactas como daquelas após os ensaios mecânicos, foram realizadas somente por peneiramento, excluindo as análises por sedimentação, seguindo o procedimento descrito na NBR 7181. Isso se justifica pela pequena porcentagem de finos. Além disso, a imersão em água poderia causar expansão da pirita, ocasionando fragmentação das partículas. Por este motivo, também o peneiramento foi realizado sem lavagem, preferindo-se usar material já bastante seco para minimizar os erros advindos da agregação de partículas menores às maiores e da presença de pequenos torrões.

Nos ensaios de peneiramento foram utilizadas peneiras de malha quadrada com as seguintes aberturas: 50,8; 38,1; 25,4; 19,1; 9,5; 6,4; 4,8; 2,4; 2,0; 1,2; 0,60; 0,42; 0,30; 0,21; 0,15 e 0,074mm.

A partir das curvas de distribuição granulométrica foram obtidos os coeficientes de uniformidade  $C_u$  e de curvatura  $C_c$ .

#### **6.3.2. Massa específica das partículas**

Esses ensaios foram realizados tanto para as amostras coletadas nos ensaios em campo como para as coletadas para realização dos ensaios de caracterização e mecânicos. Como os rejeitos possuem partículas com diâmetro variando desde pedregulho até argila, foi necessário executar ensaios para as frações fina e grossa separadamente.

Os ensaios com a fração grossa, retida na peneira de abertura 4,8mm, foram realizados pelo método da balança hidrostática. Já para a fração fina, abaixo de 4,8mm, foi utilizado o método do picnômetro, com uso de bomba de vácuo, seguindo o procedimento descrito na NBR 6508.

O resultado final foi determinado pela média ponderada dos resultados das duas frações, considerado as porcentagens, em massa, de material passante e retido na referida peneira.

Nos ensaios de caracterização, as frações  $R_1$  e  $R_2$  foram misturadas na proporção em que ocorrem em campo. Os resultados são da mistura.

### 6.3.3. Índices de vazios máximo $e_{\text{máx}}$ e mínimo $e_{\text{mín}}$

O índice de vazios máximo dos rejeitos foi determinado mediante lançamento do material num recipiente cilíndrico de, aproximadamente, 15cm de diâmetro e 20cm de altura, preenchido com água. O lançamento ocorreu a cerca de 5cm acima do nível d'água e em pequenos acréscimos, de modo a deixar o material o mais fofo possível.

Na determinação do índice de vazios mínimo foi utilizado o mesmo cilindro citado anteriormente. Os rejeitos foram compactados em cinco camadas, por meio de vibração e sob a pressão uniforme de um disco de aproximadamente 3,0kg de massa.

Para ambos os ensaios, foram retiradas das amostras as partículas maiores que 3,0cm, isto é, um quinto da menor dimensão do cilindro. Foram seguidos os procedimentos das normas NBR 12.051 e NBR 12.004.

### 6.3.4. Índice de forma

O índice de forma  $I_F$  determinado a partir das relações entre comprimento e espessura das partículas, obtidas por meio de medição direta, com paquímetro, seguindo o procedimento da norma NBR 7809. Para cada partícula  $n$  o  $I_{Fn}$  é dado por:

$$I_{Fn} = \frac{C_n}{E_n} \quad (6.1)$$

onde  $C_n$  é o comprimento da partícula  $n$ , definido como a maior dimensão, e  $E_n$  é a espessura da partícula  $n$ , definida como a menor distância entre dois planos paralelos entre si e paralelos em relação à direção do comprimento.

Para cada tipo de rejeito, foram estudadas cerca de 200 partículas, divididas em 4 frações granulométricas, proporcionalmente à porcentagem, em massa, retida nas peneiras 25,4 ; 19,1 ; 12,7 e 9,5mm. O índice de forma não foi determinado para partículas passantes na peneira de abertura 9,5mm.

Cada faixa granulométrica teve seu índice de forma determinado. A média ponderada desses é definida como o índice de forma  $I_F$  do material.

### 6.3.5. Resistência à abrasão

A determinação da resistência à abrasão foi realizada por meio de ensaios de abrasão Los Angeles. O procedimento adotado foi o apresentado na metodologia de ensaio ME-035/98, do antigo DNER, atual DNIT, com uma pequena adaptação.

Na norma são propostas sete diferentes graduações de amostras para execução dos ensaios. A que melhor se adaptava às características dos materiais em estudo era a graduação A, que

especificava o uso de 5,0kg divididos em quatro frações granulométricas: 38,1 - 25,4; 25,4 - 19,1; 19,1 - 12,7; 12,7 - 9,5mm. Todavia, o rejeito Bonito possuía quantidade insuficiente de partículas passantes na 38,1 e retidas na 25,4mm. Por isso, para permitir melhor comparação de resultados, optou-se por não utilizar esta fração para ambos os materiais. Para completar os 5,0kg, adotou-se a fração passante na peneira de abertura 9,5 e retida na 6,3mm, que é sugerida para a graduação B. Desse modo, foi possível atingir a quantidade de material necessária para os dois tipos de rejeito. Foram realizados três ensaios para cada tipo, com o objetivo de obter maior representatividade dos resultados.

#### **6.4. ENSAIOS MECÂNICOS**

A granulometria dos rejeitos não permite que sejam utilizados equipamentos convencionais de mecânica dos solos para determinação dos parâmetros de compressibilidade e resistência ao cisalhamento. O diâmetro máximo de partícula chega a 75mm. Portanto, são necessários equipamentos de grandes dimensões para realização de ensaios mecânicos com amostras na granulometria de campo.

Ensaio com equipamentos de grandes dimensões são mais trabalhosos e envolvem custos maiores que ensaios convencionais. Uma alternativa, geralmente adotada para enrocamentos, é realizar modelações físicas da granulometria e utilizar equipamentos menores que os necessários para ensaiar amostras em escala natural. Exemplo disso é o emprego de curva granulométrica paralela à de campo. Veiga Pinto (1983) analisou detalhadamente modelações físicas em enrocamentos. Embora esse tipo de procedimento possa conduzir a bons resultados, não é a situação ideal. Todavia, optou-se por realizar tanto ensaios de grandes com de pequenas dimensões com o objetivo de comparar os resultados.

O Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC já possuía um equipamento de compressão unidimensional para enrocamentos, desenvolvido por Pacheco (2005). No entanto, não existia nenhum equipamento de grandes dimensões para determinação de parâmetros de resistência. Por isso, decidiu-se projetar e construir um equipamento de cisalhamento direto que permitisse estudar tanto rejeitos de carvão, classificados como pedregulhos, como, futuramente, enrocamentos.

## 6.4.1. COMPRESSÃO UNIDIMENSIONAL DE GRANDES DIMENSÕES

### 6.4.1.1. Equipamento

O equipamento, desenvolvido por Pacheco (2005) e apresentado na Figura 6.3, é composto essencialmente por: célula de compressão, atuador de hidráulico, pórtico de reação, grelha de aço, base de concreto. A instrumentação é composta por: três células de carga, para medição das forças de atrito entre os corpos de prova e a parede interna da célula de compressão, oito extensômetros elétricos (*strain gages*) para medição de deformações da parede lateral da célula, e três transdutores de deslocamento verticais.



Figura 6.3 - Equipamento de compressão unidimensional de grandes dimensões

A célula de compressão, em aço, tem formato cilíndrico, com diâmetro interno de 100cm e altura útil de 50cm, com paredes de 9,5mm de espessura. Sua base é em concreto de alta resistência mecânica, de cerca de 10cm de altura, circundada por um anel de aço. O *top-cap*, também em aço, possui espessura de aproximadamente 12cm, na parte central.



Ao longo das laterais externas da célula de compressão foram instalados 8 *strain gages*, simetricamente e na metade da altura do corpo de prova. Por meio deles é possível determinar as tensões horizontais atuantes nas paredes internas da célula em decorrência do esforço vertical aplicado (ver item 6.4.1.3). Com isso é possível calcular o coeficiente de empuxo no repouso  $K_0$  do material em qualquer momento durante o ensaio.

A aplicação do carregamento vertical foi realizada por meio de um atuador hidráulico com capacidade de 1960kN (200t) e curso máximo de 220 milímetros. O controle do mesmo foi realizado por servo-válvulas acionadas por computador. O atuador funciona tanto com carga controlada como com deslocamento controlado. Todos os ensaios foram realizados com carga controlada. O equipamento também permite controlar velocidade de aplicação de carga.

No *top-cap* foram posicionados 3 transdutores de deslocamento (LVDT) para medir deformações verticais dos corpos de prova. Foram instalados à mesma distância da borda e com mesmo ângulo de espaçamento, de 120°. As deformações apresentadas nos resultados representam as médias das deformações registradas pelos três transdutores.

As forças de atrito do rejeito com a parede interna da célula de compressão foram medidas por meio de três células de carga instaladas sob suportes de aço soldados no lado externo da parede, equidistantes entre si de 120°. A célula de compressão foi apoiada, pelos suportes, diretamente sobre as células de carga e qualquer esforço vertical a elas transmitidas era registrado pelo sistema de aquisição de dados. Duas células de carga tinham capacidade para 490kN (50t) e a terceira para 196kN (20t). Após os ensaios, na fase de análise dos dados, descontou-se a parcela perdida por atrito, dada pela soma das cargas medidas pelas três células de carga, da carga total aplicada pelo atuador hidráulico. Com isso foi possível conhecer a força realmente aplicada nos corpos de prova, denominada força vertical líquida (ver item 6.4.1.3).

A célula da compressão podia ser deslocada para o lado da plataforma, fora do pórtico de reação, por meio de uma grelha de aço situada abaixo ela e equipada com rodas de aço que corriam sobre dois trilhos horizontais, conforme ilustra a Figura 6.4. Esse deslocamento auxiliou na compactação e a retirada dos corpos de prova, que seria mais trabalhoso se fosse realizado sob o pórtico. Após a compactação, a célula de compressão era posicionada sob o pórtico e as rodas erguidas, ficando a grelha diretamente apoiada sobre a plataforma. Após o ensaio, deslocava-se novamente a célula para retirada dos corpos de prova.



Figura 6.4 – Célula de compressão na posição de compactação dos corpos de prova

Entre a base da célula e a grelha colocou-se manta de borracha com 1cm de espessura, associada a uma chapa de madeira, com o objetivo de distribuir mais uniformemente as tensões verticais sobre a grelha. As medidas de deformação não foram afetadas pela compressão desses elementos, já que os suportes dos transdutores de deslocamento verticais foram fixados na base da célula.

Devido a problemas de leitura de alguns *strain gages*, usados para determinar as tensões radiais, foi necessário verificar a integridade de todos os oito. Nenhum apresentou problema. Os problemas tinham como causa a fiação que ligava os *strain gages* ao sistema de aquisição de dados. Foi necessário substituir toda a fiação, com o que os problemas foram solucionados. Posteriormente, foi realizada uma nova verificação de funcionamento dos *strain gages* seguindo o mesmo procedimento adotado por Pacheco (2005).

#### 6.4.1.2. Procedimentos de ensaio

##### a) Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram compactados e ensaiados na umidade de campo. Para isso, inicialmente o rejeito foi umedecido e homogeneizado até atingir referida umidade, conforme indica a Figura 6.5. Em seguida, foi lançado no interior da célula de compressão e compactado.



Figura 6.5 - Umedecimento e homogeneização do rejeito

Os corpos de prova foram compactados em quatro camadas, de 12,5cm de espessura cada. O material correspondente à cada camada foi umedecido, homogeneizado, lançado e compactado independentemente dos referentes às demais camadas. A quantidade de material necessário para formar cada camada foi cuidadosamente calculada e as paredes internas da célula receberam marcos de orientação para garantir a espessura estipulada. As massas úmidas utilizadas para compactação das quatro camadas foram de 662 e 697kg para os rejeitos Bonito e Barro Branco, respectivamente.

A compactação foi realizada por meio de uma placa vibratória retangular de 45 x 66cm parafusada numa chapa circular, de aço, com 96cm de diâmetro, isto é, próximo do diâmetro interno da célula de compressão, de 100cm. Essa placa possuía massa de aproximadamente 190kg, sendo composta por um motor à combustão associado a um excêntrico, responsável pela vibração, conforme mostrado na Figura 6.6. Essa placa apresentou bom desempenho nos ensaios realizados por Pacheco (2005) e na presente pesquisa.



Figura 6.6 - Placa vibratória utilizada para compactação dos corpos de prova

Após a etapa de compactação, foram posicionados o *top-cap*, as células de carga para medir o atrito lateral e os transdutores de deslocamento, conforme ilustra a Figura 6.7. Colocou-se uma rótula entre o pistão do atuador hidráulico e o *top-cap*, com o objetivo de permitir a rotação deste último durante o ensaio.



Figura 6.7 - Equipamento pronto para início do ensaio

#### *b) Execução do ensaio*

Com o objetivo de obter dados que permitissem determinar recalques de depósitos rejeito de grande altura, procurou-se simular nos ensaios aterros de até 80 metros. Este valor é bem superior a altura dos depósitos atualmente encontrados na bacia carbonífera catarinense, que, em geral, atingem no máximo 40 metros. Porém, futuramente pode vir a ser necessário construir depósitos de maior altura.

Foram adotados nove estágios de carregamento, com um adicional, denominado Estágio 0, necessário para equilibrar os esforços no início dos ensaios. As tensões verticais totais (incluindo as forças de atrito) e líquidas médias (sem as forças de atrito e a meia altura dos corpos de prova) para cada estágio de carregamento, para os dois corpos de prova ensaiados, estão apresentadas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Tensões verticais totais e líquidas médias dos estágios de carregamento

Estágio de carregamento	Barro Branco		Bonito	
	Tensão vertical (kPa)		Tensão vertical (kPa)	
	Total	Líquida média	Total	Líquida média
0	26	24	32	30
1	59	54	72	66
2	81	73	95	86
3	117	104	131	118
4	171	153	185	165
5	257	235	271	234
6	393	351	404	353
7	596	523	608	532
8	910	796	922	808
9	1393	1222	1405	1238

A velocidade de aplicação de carga foi de 2,6 kN/segundo. A escolha desta teve como base a experiência adquirida por Pacheco (2005) quando da realização de ensaios com enrocamento utilizando o mesmo equipamento. O tempo mínimo de permanência com carga constante em cada estágio foi de 30 minutos. Nos últimos estágios de carregamento foram necessários até 160 minutos para estabilização das deformações verticais.

Após o término do último estágio de carregamento, foram realizados seis estágios de descarregamento. As tensões utilizadas estão indicadas na Tabela 6.2. A velocidade de alívio de carga foi também de 2,6 kN/segundo. Uma vez estabilizadas as deformações verticais, dava-se início a um novo estágio.

Tabela 6.2 - Tensões verticais totais e líquidas médias dos estágios de descarregamento

Estágio de descarregamento	Barro Branco		Bonito	
	Tensão vertical (kPa)		Tensão vertical (kPa)	
	Total	Líquida média	Total	Líquida média
1	908	776	922	803
2	592	497	605	527
3	388	323	402	353
4	259	217	270	242
5	171	146	186	170
6	120	104	132	124



*c) Retirada das amostras e ensaios de caracterização*

Após o término dos ensaios, as amostras foram retiradas da célula de compressão. Foram reservados cerca de 10% da massa total, ou 65kg, para a realização de ensaios de granulometria. Desta quantidade, metade foi retirada da parte superior e a outra metade da parte inferior dos corpos de prova. Desse modo, foi possível analisar a influência da perda de carga por atrito na quebra de partículas. A Figura 6.8 mostra o corpo de prova Bonito após o ensaio. A marca branca horizontal indica o topo do corpo de prova antes do início do ensaio.



Figura 6.8 - Corpo de prova após o término do ensaio.

A Figura 6.9 mostra a parcela do corpo de prova Bonito reservada para ensaios de granulometria depois do ensaio mecânico.



Figura 6.9 - Parte do rejeito coletado para realização de análises granulométricas após o ensaio

#### 6.4.1.3. Cálculo do ensaio

Os resultados de deformação vertical em função da tensão aplicada foram apresentados descontando-se a carga perdida por atrito entre os corpos de prova e a parede interna da célula de compressão. Acredita-se que a distribuição da força de atrito  $F_{at}$  ao longo da altura da parede não é uniforme ao longo da altura, conforme ilustrado na Figura 6.10. Provavelmente, ocorre maior perda de carga por unidade de comprimento no topo do corpo de prova do que na base, já que as tensões normais à parede são maiores no topo. Porém, não se sabe se o decréscimo das forças de atrito varia linearmente com a altura.

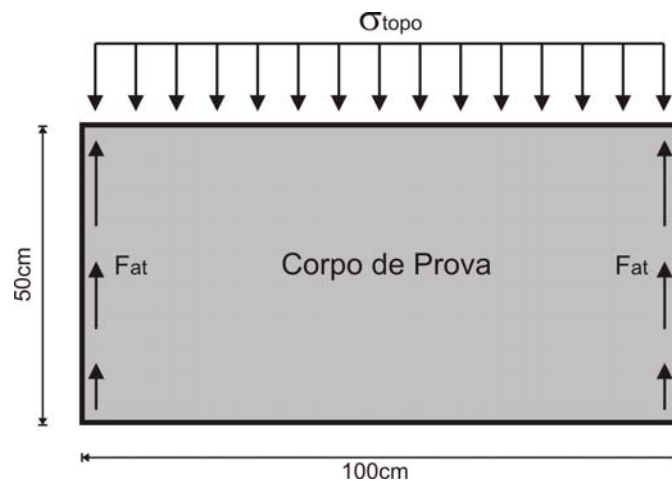


Figura 6.10 - Forças de atrito nas paredes da célula de compressão

Procurou-se determinar as tensões atuantes no centro dos corpos de prova, denominada tensão vertical líquida média, para correlacionar com as deformações verticais. A nomenclatura “líquida” origina-se do desconto das forças de atrito. Já o “média” se refere à tensão atuante no centro do corpo de prova. Como simplificação, admitiu-se perdas por atrito por unidade de comprimento constantes ao longo da altura da parede. Portanto, a tensão vertical líquida média foi obtida descontando-se metade da força total de atrito da força aplicada no *top-cap*, e dividindo-se o resultado pela área do corpo de prova, de 0,785m<sup>2</sup>.

Pode-se ainda calcular a tensão de cisalhamento média entre a parede interna e o corpo de prova, representada por  $\tau_{pc}$ , dividindo-se a força total de atrito pela área da parede interna, dada pelo perímetro vezes a altura, igual a 1,57m<sup>2</sup>. Esta área, do início do ensaio, vai diminuindo à medida que o corpo de prova se deforma e diminui sua altura. A tensão  $\tau_{pc}$  foi utilizada para estimar a perda de carga por atrito nos ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões.

A determinação das tensões horizontais atuantes nas paredes internas da célula de compressão seguiu a mesma metodologia adotada por Pacheco (2005). Admitiu-se que o aço e os

*strain gages* possuíam adesão perfeita, isto é, que as deformações medidas nos *strain gages* eram iguais às do aço das paredes. O procedimento ideal seria calibrar o sistema aplicando pressão hidrostática nas paredes e correlacioná-las com as deformações medidas nos *strain gages*, conforme já salientado por Pacheco (2005). Porém, as dificuldades de vedação da célula impediram que essa alternativa fosse adotada.

A partir das dimensões da célula, das deformações da face externa parede  $\varepsilon'_c$ , medidas pelos *strain gages*, do módulo de elasticidade  $E$  (214GPa) e do coeficiente de poisson do aço  $\mu$  (0,28) pode-se obter a tensão radial atuante na face interna da parede. A Figura 6.11 indica os esforços horizontais do corpo de prova sobre as paredes  $\sigma_r$ , as tensões de tração no aço  $\sigma_c$  e as deformações do aço  $\varepsilon'_c$ .

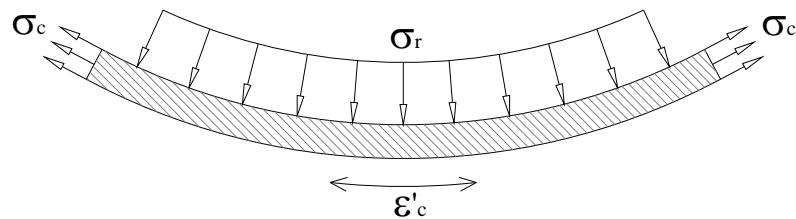


Figura 6.11 - Tensões atuantes nas paredes da célula

para a célula de compressão utilizada tem-se: 
$$\sigma_r = E \times \varepsilon'_c \times \left(r + \frac{e_s}{2}\right) \times \frac{e_s}{r \times (r + e_s)} \quad (6.2)$$

onde  $r$  é o raio interno da célula, igual a 0,5m, e  $e_s$  a espessura da parede, igual a 9,52mm. Substituindo os valores tem-se:

$$\sigma_r = 4036494,9 \times \varepsilon'_c \quad (6.3)$$

Pacheco (2005) apresentou a dedução da equação 6.2.

Os cálculos das tensões horizontais  $\sigma_r$  foram realizados sempre com a média aritmética das leituras dos 8 *strain gages*. Assim como as forças de atrito, as tensões horizontais provavelmente não são constantes ao longo da altura da parede. Acredita-se que elas sejam maiores no topo do que na base, pois parte da carga vertical se perde por atrito com as paredes, sendo maior no topo. A Figura 6.12 ilustra esta distribuição de tensões. Não se sabe se a variação é linear, como está indicado.



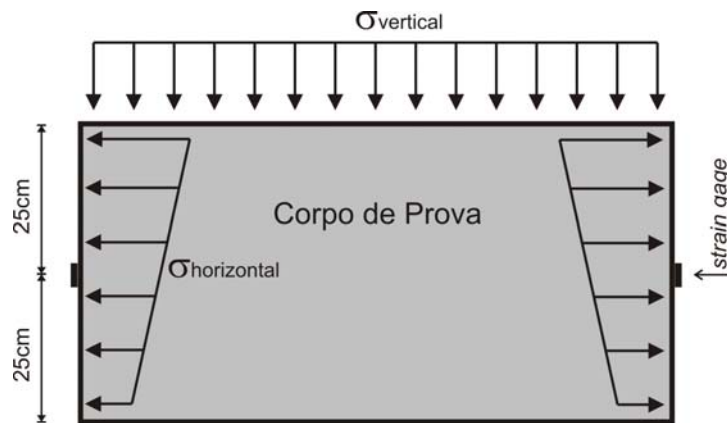


Figura 6.12 - Distribuição de tensões horizontais ao longo das paredes da célula

O cálculo do coeficiente de empuxo no repouso  $K_0$  foi realizado a partir na curva tensão vertical líquida média *versus* tensão horizontal média. O  $K_0$  é o coeficiente angular de reta. Para casos em que a inclinação não se manteve constante ao longo do ensaio, a curva foi dividida em trechos homogêneos de mesma inclinação e o  $K_0$  calculado para cada trecho.

#### 6.4.2 CISALHAMENTO DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES

O equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões desenvolvido no LMS foi detalhadamente apresentado no Capítulo 4. Nas páginas seguintes serão descritos os procedimentos adotados na execução dos ensaios e as considerações de cálculo. Foram realizados ensaios somente com rejeitos Barro Branco.

##### 6.4.2.1. Procedimentos de ensaio

###### a) Preparação dos corpos de prova

Assim como os corpos de prova de compressão unidimensional, os de cisalhamento direto foram compactados no mesmo índice de vazios e teor de umidade de campo. Os procedimentos de preparação e compactação foram análogos aos adotados nos ensaios de compressão unidimensional.

Os rejeitos foram umedecidos, homogeneizados, lançados na caixa de cisalhamento e compactados com placa vibratória (PV 2000, da fabricante Weber MF) fixada na chapa ranhurada de topo. A Figura 6.13 mostra os rejeitos no interior da caixa, já espalhados e prontos para serem compactados. A Figura 6.14 apresenta a placa vibratória fixada na chapa ranhurada.

Adotou-se 5 camadas de compactação: a primeira (de base) com espessura de 14,6cm, as três seguintes com 14,2cm e a de topo com 13,6cm. As diferenças nas espessuras tiveram por

objetivo alinhar o centro da terceira camada com o plano de ruptura imposto, reduzindo o efeito de deslizamento nos planos de contato de camadas adjacentes, que são planos preferenciais de ruptura. Cabe salientar que as ranhuras da chapa propiciaram maior atrito entre as camadas. O controle de espessuras foi feito a partir de marcos de referência instalados nas paredes internas da caixa.



Figura 6.13 - Rejeitos espalhados no interior da caixa de cisalhamento

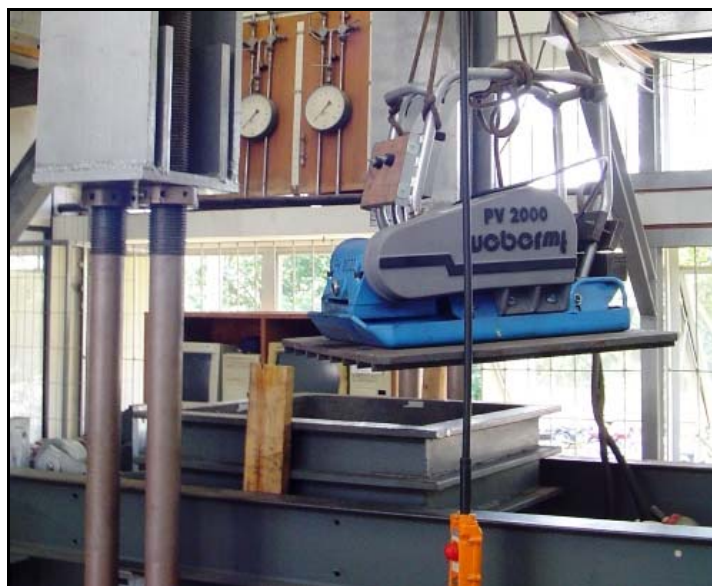


Figura 6.14 - Placa vibratória PV 2000 parafusada na chapa ranhurada

Durante a compactação as caixas inferior e superior permaneceram unidas por quatro parafusos instalados nos reforços das paredes. Estes foram retirados antes do estágio de consolidação, primeira etapa do ensaio.

#### *b) Execução do ensaio*

O ensaio é dividido em dois estágios: consolidação e cisalhamento. Antes de consolidação a caixa de cisalhamento, já com o *top-cap*, foi centrada com o pórtico vertical e deslocada horizontalmente até que as polias encostassem nas chapas de reação. Os trilhos inferiores foram ajustados e foram instaladas sobre o *top-cap* a rótula e a célula de carga, além de três transdutores deslocamento para medição de deformações verticais.

A velocidade de aplicação de tensão de consolidação foi elevada, atingindo o valor final em poucos segundos. Após atingida a carga prevista para se obter a tensão desejada, ela foi mantida relativamente constante até o final do estágio de cisalhamento. À medida que o corpo de prova se deformava ocorria perda de carga, tornando necessário avançar o pistão para recuperá-la. Para maiores detalhes sobre as dificuldades encontradas ver Capítulo 4, item 4.3.2. Foram realizados ensaios com tensões normais totais iniciais de consolidação de 100, 270, 350, 430 e 600kPa. As tensões normais no plano de ruptura, denominadas “tensões normais líquidas”, foram menores devido às perdas de carga por atrito com as paredes da caixa.

Não foram medidas as forças de atrito surgidas entre os corpos de prova e a face interna da parede da caixa de cisalhamento, pois o equipamento não permitia. No entanto foi possível estimá-la a partir dos dados obtidos com os ensaios de compressão unidimensional, executados com os mesmos materiais e nos mesmos índices de vazios, nos quais as forças de atrito foram medidas. Para determinação das envoltórias de ruptura foi utilizada a tensão atuante no plano de ruptura, menor que a tensão aplicada no topo do corpo de prova. As considerações de cálculo adotadas para estimar as forças de atrito serão descritas no item 6.4.2.2.

Após estabilizadas as deformações verticais decorrentes da tensão de consolidação, foi iniciado o estágio de cisalhamento, sem alteração da carga vertical. O cisalhamento foi provocado pelo deslocamento de caixa inferior com velocidade constante de 0,60mm/min. Se fosse adotado o mesmo critério de Maia (2001), conforme item 3.3.1.2, a velocidade para o equipamento utilizado seria de 1,05mm/min. Como os rejeitos Barro Branco possuem até 7% de sua massa composta por partículas menores que 2,0mm de diâmetro (ver item 7.3.1) e é bastante sujeito a fenômenos de fluência, optou-se por empregar velocidade de cisalhamento mais baixa.

#### *b) Retirada da amostra e ensaios de caracterização*

Da mesma forma que para os ensaios de compressão unidimensional, nos de cisalhamento direto parte do material já ensaiado foi reservado para avaliação da quebra de partículas. Retirou-se amostras de três pontos do corpo de prova: topo (perto do *top-cap*), meio (no plano de cisalhamento) e base. Para cada ponto foi retirado cerca de 30kg de material. Comparado-se os resultados dos ensaios de granulometria das três amostras foi possível avaliar o efeito do surgimento de tensões de cisalhamento, ocorrido preponderantemente na da parte central, na quebra de partículas,. A Figura 6.15 mostra o topo de um corpo de prova após o ensaio.

As análises granulométricas de amostras retiradas dos corpos de prova foram realizadas para as tensões normais totais de 100, 270, 430 e 600kPa. Para o ensaio com 350kPa não foi determinada a granulometria após o ensaio porque problemas ocorridos com uma das bombas de óleo impediram a conclusão do ensaio. Infelizmente não foi possível considerar o efeito da compactação na quebra de partículas, para descontá-lo das análises realizadas. Procurou-se, na medida do possível, retirar as amostras de pontos afastados dos limites entre camadas de compactação.



Figura 6.15 - Topo do corpo de prova após ensaio

#### **6.4.2.2. Cálculo do ensaio**

Para determinação da envoltória de ruptura foi necessário descontar as forças perdidas por atrito lateral. Tais forças foram determinadas nos ensaios de compressão unidimensional. Esses dados foram utilizados para estimar as perdas por atrito nos ensaios de cisalhamento direto.

Admitiu-se que o ângulo de atrito rejeito-parede era o mesmo para os dois tipos de ensaio. O perímetro da célula de compressão unidimensional é de 3,14m, enquanto o da caixa de cisalhamento é de 2,80m, a partir do que se pode concluir que a perda de carga por atrito por unidade de altura do corpo de prova é maior para o ensaio de compressão unidimensional, para mesma tensão vertical. No ensaio de cisalhamento buscou-se estimar a tensão normal atuante no plano de ruptura, denominada tensão normal líquida média, isto é, à meia altura do corpo de prova ou 35cm abaixo da chapa ranhurada de topo. No ensaio de compressão unidimensional as forças de atrito foram determinadas para a altura total do corpo de prova, de 50cm.

As perdas por atrito foram estimadas da seguinte forma: a) calculou-se as perdas ocorridas no ensaio de compressão unidimensional até a profundidade de 35cm abaixo do topo do corpo de prova, adotando-se as simplificações citadas no item 6.4.1.3; b) calculou-se as perdas por unidade de área de parede, neste caso 1,10m<sup>2</sup>; c) multiplicou-se o valor obtido pela área de parede da caixa de cisalhamento até a profundidade de 35cm, neste caso 0,98m<sup>2</sup>. O valor obtido representa a força perdida por atrito no ensaio de cisalhamento direto ao longo dos 35cm superiores do corpo de prova.

Nos cálculos foram utilizados dados do ensaio de compressão unidimensional (estágios de carregamento) cujas tensões verticais totais eram similares às aplicadas nos ensaios de cisalhamento direto. Outra simplificação de cálculo adotada foi admitir que as forças de atrito não variavam durante o cisalhamento do corpo de prova. Também foram desconsideradas as deformações verticais no cálculo, que interferem no valor de área de parede.

## CAPÍTULO 7 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 7.1. INTRODUÇÃO

Os ensaios realizados para a presente pesquisa se dividem em cinco grupos: a) ensaios de campo para determinação da massa específica aparente seca e outros índices físicos, b) ensaios de caracterização física das partículas e do meio granular, c) ensaios de compressão unidimensional de grandes dimensões, d) ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões e e) ensaios de compressão unidimensional e de cisalhamento direto de pequenas dimensões. Os quatro últimos grupos foram executados no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFSC.

Nas páginas seguintes são apresentados e analisados os resultados dos ensaios citados acima. Atenção especial é dedicada aos ensaios mecânicos de grandes dimensões. As metodologias adotadas nos ensaios foram descritas do Capítulo 6.

### 7.2. ENSAIOS DE CAMPO

Os resultados de teor de umidade  $h$ , massa específica aparente natural  $\gamma_n$  e massa específica aparente seca  $\gamma_s$ , para os seis ensaios de campo, são apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Teores de umidade e massas específicas aparentes de campo

	Rejeito	Ensaio nº	$h$ (%)	$\gamma_n$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )
Mina do Cooperminas	Barro Branco	1	2,7	1,85	1,81
		2	4,4	1,85	1,77
		3	4,1	1,96	1,88
Mina do Barro Branco	Bonito	1	4,1	1,45	1,40
		2	3,6	1,71	1,65
		3	3,7	1,74	1,68

Os baixos valores de teor de umidade são explicados pela pequena capacidade de retenção de água dos rejeitos, por se tratarem de pedregulhos, e pela perda de água ocorrida durante o transporte do campo para o laboratório. Esta perda não influenciou os resultados de massa específica aparente, pois a determinação do teor de umidade e da massa úmida do material retirado do furo ocorreu simultaneamente. Cabe ressaltar que os teores de umidade adotados para a moldagem dos corpos de prova dos ensaios mecânicos foram obtidos com outras amostras,

adequadamente acondicionadas e encaminhadas ao laboratório. Estas resultaram em 6,3% e 8,2% para os rejeitos Barro Branco e Bonito, respectivamente.

O valor médio de  $\gamma_s$  foi de 1,82 e 1,58g/cm<sup>3</sup> para os rejeitos Barro Branco e Bonito, respectivamente. A grande diferença entre esses valores é explicada pelo fato das partículas constituintes dos rejeitos Barro Branco possuírem maior massa específica em relação às que compõem o Bonito. Os resultados dos ensaios de massa específica das partículas  $\gamma_g$ , para as seis amostras da Tabela 7.1, juntamente com os respectivos valores de índices de vazios  $e$ , são apresentados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 - Massa específica das partículas e índices de vazios para cada ensaio de campo

	Rejeito	Ensaio n°	$\gamma_g$ (g/cm <sup>3</sup> )	$e$
Mina Cooperminas	Barro Branco	1	2,82	0,56
		2	2,65	0,50
		3	2,73	0,45
Mina do Barro Branco	Bonito	1	2,27	0,63
		2	2,51	0,52
		3	2,51	0,49

Conforme já citado, percebe-se grandes diferenças entre as massas específicas das partículas tanto se comparando rejeitos diferentes como para amostras diferentes de um mesmo tipo de rejeito. Os valores médios ficaram em 2,73 e 2,45g/cm<sup>3</sup> para os rejeitos Barro Branco e Bonito, respectivamente. A Tabela 7.3 apresenta os índices físicos médios dos ensaios de campo, já com o teor de umidade corrigido. Estes foram os índices adotados na moldagem dos corpos de prova dos ensaios de compressão unidimensional e de cisalhamento direto.

Tabela 7.3 - Índices físicos médios adotados nos ensaios mecânicos

Rejeito	$\gamma_n$ (g/cm <sup>3</sup> )	$h$ (%)	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_g$ (g/cm <sup>3</sup> )	$e$	$S$ (%)
Barro Branco	1,89	6,3	1,82	2,73	0,50	22,9
Bonito	1,63	8,2	1,58	2,45	0,55	23,6

### 7.3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

#### 7.3.1. Análise granulométrica

A Figura 7.1 apresenta as curvas de distribuição granulométrica das amostras de rejeito Barro Branco e Bonito coletadas para realização dos ensaios de compressão unidimensional.

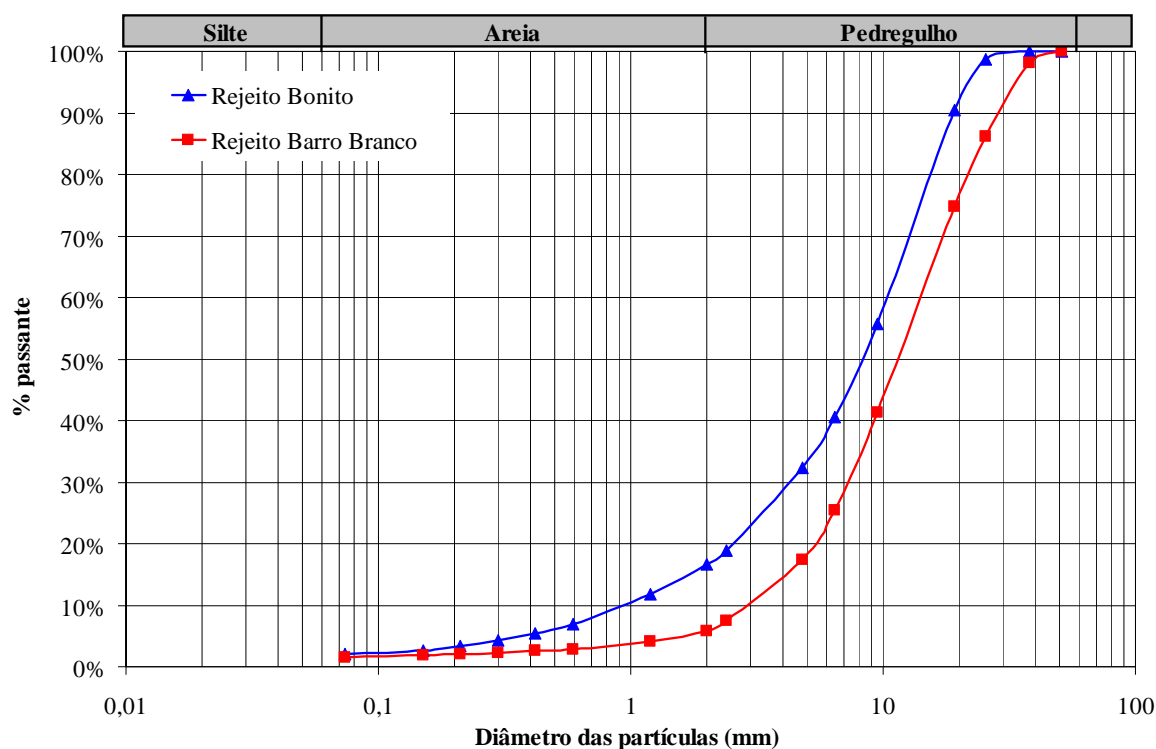


Figura 7.1 - Distribuição granulométrica dos rejeitos Barro Branco e Bonito

A granulometria mais fina do rejeito Bonito é explicada pela maior facilidade de britagem deste material durante o beneficiamento, propiciada pela menor resistência das partículas, em relação ao rejeito Barro Branco. Além disso, existe o efeito de desagregação de partículas devido à expansão da pirita. Este efeito é mais acentuado no rejeito Bonito pois a rocha matriz é menos resistente e a pirita está disseminada por toda a massa, enquanto no Barro Branco ela ocorre principalmente na forma de nódulos isolados.

As composições granulométricas correspondentes à Figura 7.1 são apresentadas na Tabela 7.4.

Tabela 7.4 - Composições granulométricas dos rejeitos Barro Branco e Bonito

Fração		Rejeito	
		Barro Branco	Bonito
Pedregulho grosso	%	25,3	9,6
Pedregulho médio	%	50,8	52,3
Pedregulho fino	%	18,2	21,4
Areia grossa	%	2,9	9,9
Areia média	%	0,8	3,5
Areia fina	%	0,6	1,3
Silte + Argila	%	1,4	2,0



Os coeficientes de uniformidade  $C_u$  e de curvatura  $C_c$  estão apresentados na Tabela 7.5.

Tabela 7.5 - Coeficientes de uniformidade  $C_u$  e de curvatura  $C_c$

Rejeito	$C_u$	$C_c$
Barro Branco	4,7	1,2
Bonito	11,0	1,9

### 7.3.2. Massa específica das partículas

Os resultados dos ensaios de massa específica das partículas para as amostras utilizadas nos ensaios mecânicos estão apresentados na Tabela 7.6.

Tabela 7.6 - Massa específica das partículas ( $\gamma_g$ )

Rejeito	Fração retida na # 4,8mm		Fração passante na # 4,8mm		Média Ponderada
	Quantidade (%)	$\gamma_g$ (g/cm <sup>3</sup> )	Quantidade (%)	$\gamma_g$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_g$ (g/cm <sup>3</sup> )
Barro Branco	83,0	2,53	17,0	2,43	<b>2,51</b>
Bonito	67,6	2,38	32,4	2,51	<b>2,42</b>

Os valores finais obtidos foram 2,51g/cm<sup>3</sup> e 2,42g/cm<sup>3</sup> para os rejeitos Barro Branco e Bonito, respectivamente. Quando comparados com a maioria dos solos, nota-se que os valores finais foram um tanto baixos, principalmente no caso do rejeito Bonito. Isso se explica pela existência de carvão mineral não recuperado pelo processo de beneficiamento, que representa, em média, de 5 a 10%, em massa, do total de rejeito.

Os resultados do rejeito Barro Branco são coerentes com aqueles apresentados por ZETA (1983) (ver item 2.6.1). Porém, ficaram abaixo dos obtidos por Maccarini e Hummes (2004) (ver item 3.4.2.1).

Para o rejeito Bonito os valores ficaram acima dos obtidos por Maccarini e Hummes (2004), de 2,25g/cm<sup>3</sup>, em média.

### 7.3.3. Índices de vazios máximos e mínimos e densidade relativa

Os índices de vazios máximos e mínimos dos dois tipos de rejeito são apresentados na Tabela 7.7.

Tabela 7.7 - Índices de vazios máximos e mínimos

Rejeito	Índice de vazios máximo ( $e_{\text{máx}}$ )	Índice de vazios mínimo ( $e_{\text{mín}}$ )
Barro Branco	0,857	0,415
Bonito	0,806	0,463

As densidades relativas dos rejeitos Barro Branco e Bonito em depósito, determinadas a partir dos ensaios de campo, ficaram em 80,7% e 74,6%, respectivamente. Eles podem ser classificados como compactos.

#### 7.3.4. Índice de forma

Os resultados de índice de forma  $I_F$  determinado para quatro faixas granulométricas dos rejeitos Bonito e Barro Branco estão apresentados nas Tabelas 7.8 e 7.9.

Tabela 7.8 - Índice de forma do rejeito Bonito

Faixa granulométrica	$I_F$
38,1 a 25,4mm	3,5
25,4 a 19,1mm	3,0
19,1 a 12,7mm	3,3
12,7 a 9,5mm	3,5

Tabela 7.9 - Índice de forma do rejeito Barro Branco

Faixa granulométrica	$I_F$
38,1 a 25,4mm	3,4
25,4 a 19,1mm	3,2
19,1 a 12,7mm	3,6
12,7 a 9,5mm	3,0

Fazendo-se a média ponderada em função das porcentagens, em massa, de cada fração em relação ao total, obteve-se o valor de 3,3 para os dois materiais. Suas partículas maiores que 9,5mm podem ser classificadas como lamelares alongadas.

#### 7.3.5. Resistência à abrasão

Os resultados dos ensaios de abrasão Los Angeles são apresentados na Tabela 7.10.

Tabela 7.10 - Perda de massa no ensaio de abrasão (%)

Rejeito	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média
Barro Branco	39,2	38,9	39,4	39,2
Bonito	44,1	43,8	43,7	43,9

Todos os ensaios resultaram em valores elevados de perda de massa, se comparados aos encontrados na bibliografia. Pacheco (2005), por exemplo, obteve 24% para enrocamento de brecha basáltica. Valores típicos para rochas duras ficam em torno de 10% e para rochas brandas, 60% (Chen, 2003).

Os resultados acima são próximos aos obtidos por ZETA (1983), apresentados no item 2.6.1.

## 7.4. ENSAIOS DE COMPRESSÃO UNIDIMENSIONAL DE GRANDES DIMENSÕES

### 7.4.1. Introdução

Os resultados dos dois ensaios de compressão unidimensional realizados com os rejeitos Barro Branco e Bonito (um com cada tipo material) são apresentados separadamente num primeiro momento. Após, esses resultados são comparados. As curvas de tempo *vs* deformação vertical acumulada e tempo *vs* tensão vertical líquida média, para cada estágio de carregamento e descarregamento, são apresentadas no Apêndice I. Neste último também são apresentadas as curvas força vertical total *vs* força de atrito individual, para cada uma das três células de carga.

Nas próximas páginas são apresentados os principais resultados, na forma dos seguintes gráficos:

1 - Força vertical total *vs* força de atrito total. A força de atrito total é a soma das forças medidas em cada uma das três células de carga. Também é apresentada a relação entre a força de atrito total e a força vertical total, em porcentagem, em função desta última.

2 - Deformação vertical específica *vs* tensão vertical líquida média. Esses gráficos foram obtidos a partir das curvas apresentadas no Apêndice I, porém utilizando deformações específicas. Nas curvas não são indicados os pontos de medição, pois seu elevado número (mais de 7000 para cada ensaio) resultaria em perda de clareza. Tais pontos experimentais são apresentados nas curvas do Apêndice I.

3 - Tensão vertical líquida média *vs* índice de vazios, também denominada curva de compressibilidade. Nesta foi correlacionado o índice de vazios do corpo de prova ao final de cada estágio de carregamento ou descarregamento com a tensão vertical líquida média aplicada no estágio (em escala logarítmica). Cada estágio é representado por um ponto na curva.

4 - Tensão vertical líquida média *versus* tensão horizontal média, atuante nas paredes da célula de compressão. As tensões horizontais foram determinadas a partir das deformações da parede da célula, medidas por *strain gages*, seguindo metodologia apresentada no item 6.4.1.3.

5 - A partir do gráfico anterior, foi determinada a relação entre a tensão horizontal média e a tensão vertical líquida média ao longo dos ensaios. Esta relação é apresentada graficamente em função da tensão vertical líquida média.

6 - Tensão vertical líquida média *vs* tensão horizontal média. O gráfico foi dividido em trechos com inclinação semelhante e o coeficiente de empuxo no repouso  $K_0$  determinado para cada trecho.

Ao final são apresentadas as curvas granulométricas dos rejeitos após os ensaios, além dos coeficientes de uniformidade  $C_u$  e de curvatura  $C_c$ .

Além dos nove estágios de carregamento previstos inicialmente foi incluído mais um, denominado Estágio 0, referente ao de posicionamento do pistão do atuador hidráulico no início do ensaio. Foram encontradas algumas dificuldades na aproximação do pistão, resultando em elevação brusca da carga e rápida estabilização. No ensaio Barro Branco o pico de carga atingiu 106kPa, reduzindo e estabilizando em 24kPa em 8 segundos. No ensaio Bonito o pico foi de 46kPa, reduzindo e estabilizando em 30kPa em 5 segundos. A carga de estabilização foi mantida constante por 128 e 28 minutos para os ensaios Barro Branco e Bonito, respectivamente. Após foi iniciado o Estágio 1.

As tensões verticais totais e líquidas médias adotadas para cada estágio estão apresentadas no Capítulo 6, item 6.4.1.2.

No final é realizada uma análise comparativa dos dois ensaios com base nos principais dados obtidos experimentalmente.

Também são apresentados resultados de ensaios em equipamentos de pequenas dimensões, realizados com modelação da granulometria, com curvas granulométricas paralelas às de campo. Os principais resultados são comparados com os obtidos nos ensaios de grandes dimensões.

## 7.4.2. Rejeito Barro Branco

### 7.4.2.1. Força vertical total vs força de atrito total

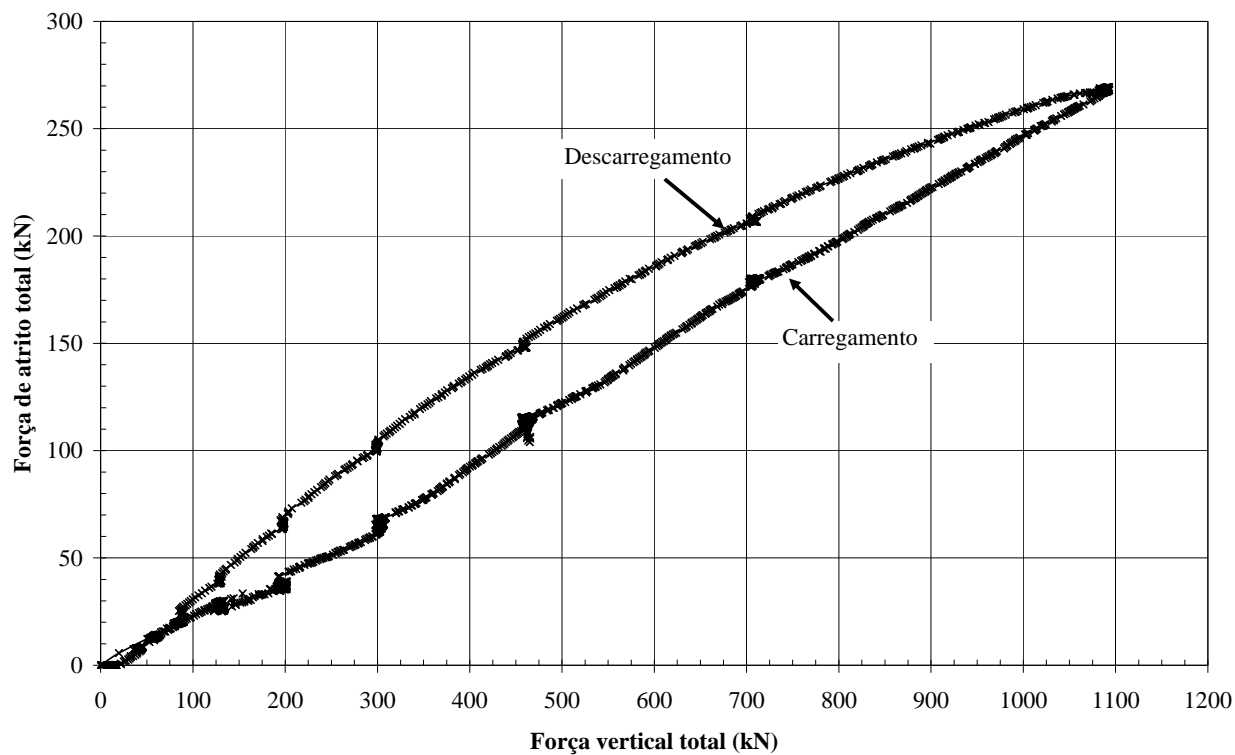


Figura 7.2 - Ensaio Barro Branco: força vertical total vs força de atrito total

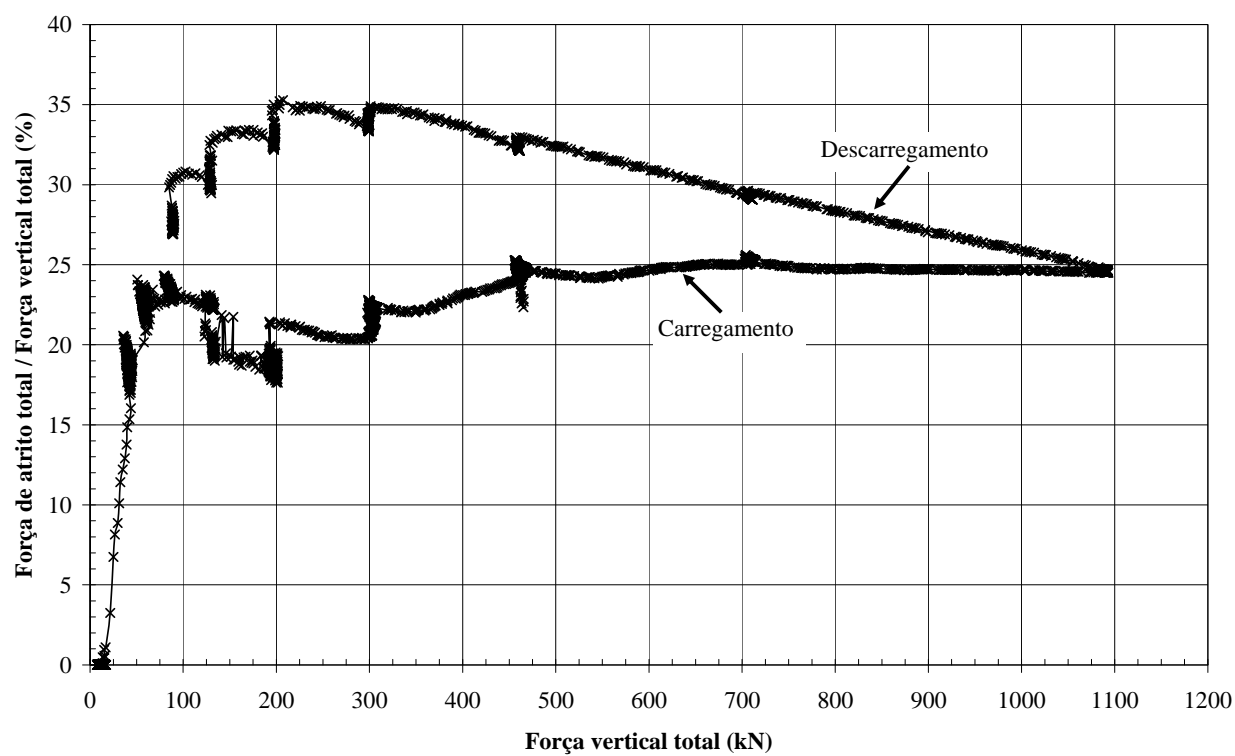


Figura 7.3 - Ensaio Barro Branco: força vertical total vs porcentagem da força de atrito

Nota-se na Figura 7.2 clara tendência das forças de atrito serem maiores nos estágios de descarregamento, quando comparados com estágios de carregamento com forças verticais totais semelhantes.

A Figura 7.3 também indica comportamentos distintos dos trechos de carregamento e descarregamento. A porcentagem de força de atrito total em relação a força vertical total atinge valores de até 35% no descarregamento, enquanto no carregamento não ultrapassa 25%. A máxima diferença chega a até 17%, quando a força vertical é da ordem de 200kN. Percebe-se ainda que para força vertical total superior à 470kN (Estágios 8 e 9) a relação é praticamente constante, em torno de 25%. No início do ensaio a relação é bastante baixa, mas aumenta rapidamente, com um trecho de oscilação entre 70 e 470kN.

A curva da Figura 7.3 teve comportamento semelhante aos apresentados por Pacheco (2005), que estudou enrocamentos de basalto e riodacito da Usina Hidrelétrica de Machadinho, utilizando o mesmo equipamento. No referido estudo, a porcentagem do atrito no trecho de descarregamento também foi significativamente maior que no de carregamento.

#### 7.4.2.2. Deformação vertical específica vs tensão vertical líquida média

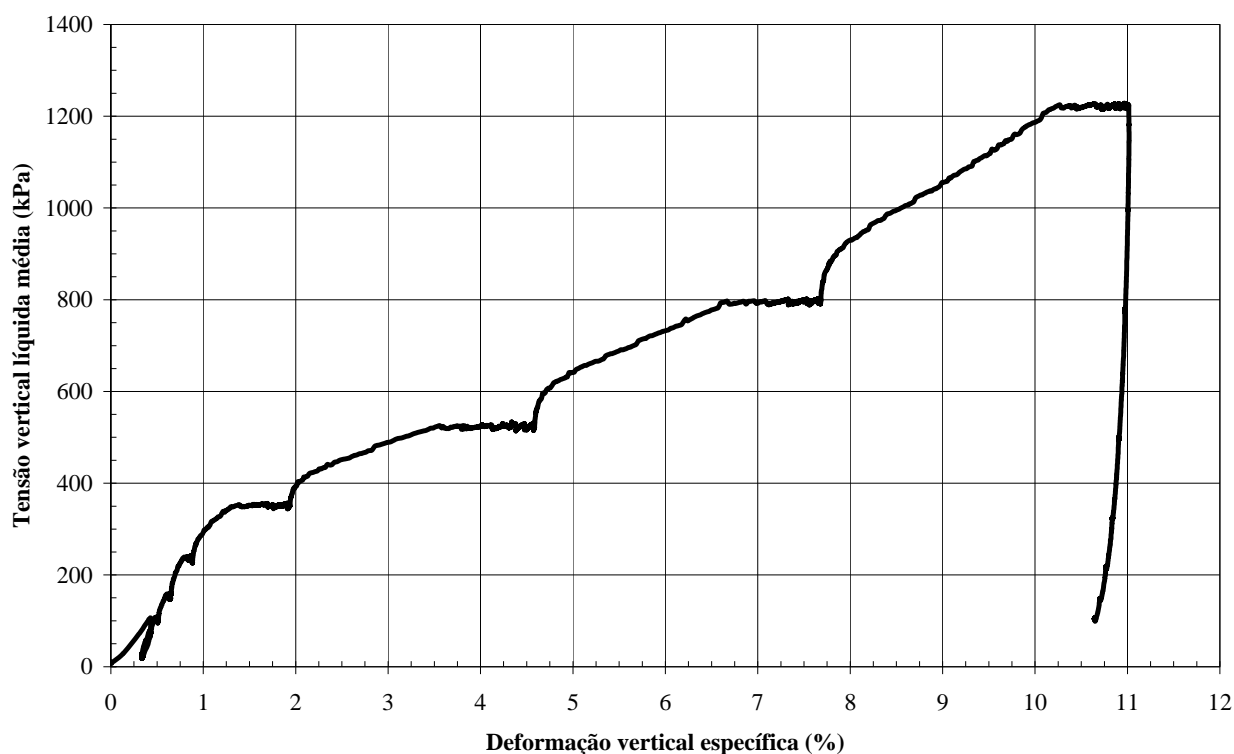


Figura 7.4 - Ensaio Barro Branco: deformação vertical específica vs tensão vertical líquida média

Percebe-se na Figura 7.4 dois trechos significativamente distintos. A inclinação média da curva até cerca de 300kPa é bem superior à do restante. De 0 a 300kPa a curva tem inclinação praticamente constante e as deformações atingem cerca de 1%. Já de 300 a 600kPa, mesmo acréscimo de tensão, a variação de deformação é 3,7%, bastante superior ao trecho anterior. É provável que a quebra de partículas esteja relacionada com essa diferença de inclinação. Possivelmente, até 300 kPa a maioria das partículas ainda estivessem integras e após tenham começado a se fraturar, causando aumento significativo das deformações. Note-se que já para o Estágio 4, com tensão da ordem de 350kPa, as deformações foram bastantes elevadas em relação às identificadas nos estágios anteriores.

Do Estágio 7 ao 9, entre os quais ocorreu 9% dos 11% da deformação total, a inclinação média da curva aumenta lentamente. Esse aumento da rigidez pode ser decorrente da sensível redução do índice de vazios até então ocorrida.

O descarregamento, realizado de 1220kPa até 100kPa, resultou em pequeno aumento de altura do corpo de prova, da ordem de 0,4%.

Cabe notar que o carregamento, até cerca de 100kPa, seguido de descarregamento, indica o Estágio 0 e é resultado das dificuldades citadas no item 7.4.1.

#### 7.4.2.3. Tensão vertical líquida média vs índice de vazios

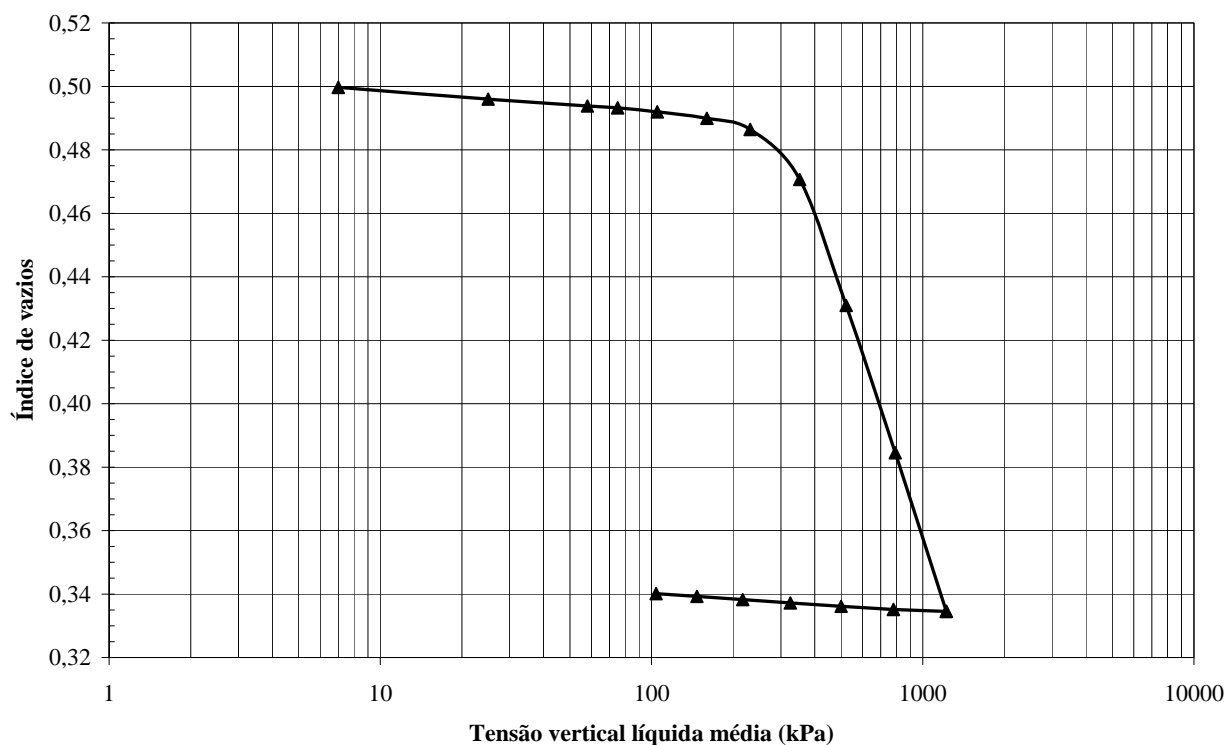


Figura 7.5 - Ensaio Barro Branco: tensão vertical líquida média vs índice de vazios

Assim como na Figura 7.4, na Figura 7.5 também fica evidente que a partir de aproximadamente 300kPa as deformações aumentam significativamente. A variação de índice de vazios até esta tensão foi de 0,02, enquanto de 300kPa até 600kPa foi de 0,065. A variação total foi de 0,165. Os valores de  $C_c$  e  $C_r$  são, respectivamente, 0,269 e 0,006.

Cabe dizer que a curva inicia em 7kPa pois é esta a tensão transmitida pelo peso próprio do *top-cap* ao corpo de prova.

É importante notar que a curva de compressibilidade do material ensaiado é bastante distinta de curvas típicas de materiais granulares, que geralmente não possuem pontos de inflexão definidos, isto é, são abatidas. A curva de compressibilidade obtida é mais semelhante às de argila moles, com elevado índice de vazios, do que com de materiais granulares. Acredita-se que este comportamento tenha relação estreita com a quebra de grande quantidade de partículas verificada (ver item 7.4.2.5). Com já citado, o ponto de inflexão da curva pode ter como causa o início da quebra de grande quantidade de partículas.

#### 7.4.2.4. Tensão vertical líquida média vs tensão horizontal média

A Figura 7.6 apresenta os resultados de tensão horizontal, obtidos com os *strain gages* instalados nas paredes externas da célula de compressão.

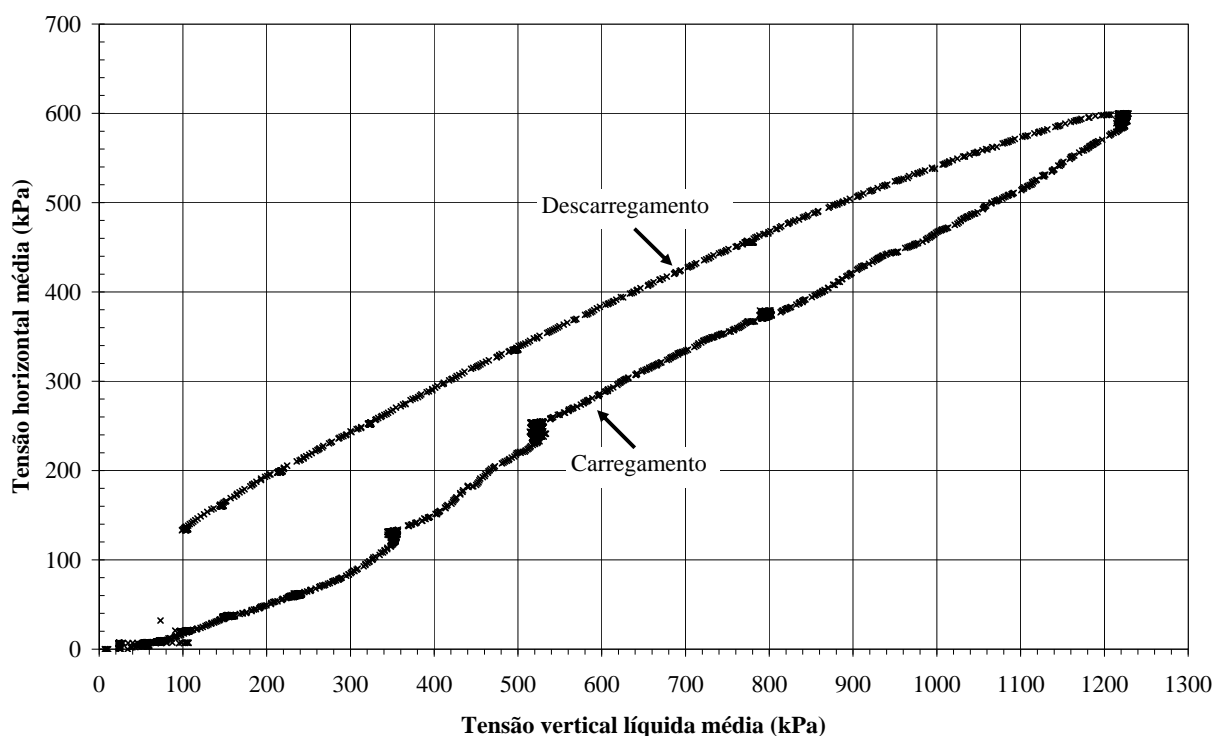


Figura 7.6 - Ensaio Barro Branco: tensão vertical líquida média vs tensão horizontal média



Nota-se que, para mesmas tensões verticais líquidas médias, as tensões horizontais médias do trecho de descarregamento foram superiores às do trecho de carregamento. Isso é coerente com o fato das forças de atrito serem maiores no descarregamento, já que estas são função das tensões horizontais.

No descarregamento não ocorreu aumento significativo das tensões horizontais durante o período em que as tensões verticais permaneceram constantes até a estabilização das deformações, diferentemente do ocorrido no final dos Estágios 6, 7 e 9 de carregamento. A Figura 7.7 apresenta a relação entre a tensão horizontal média e a tensão vertical líquida média, em função desta última.

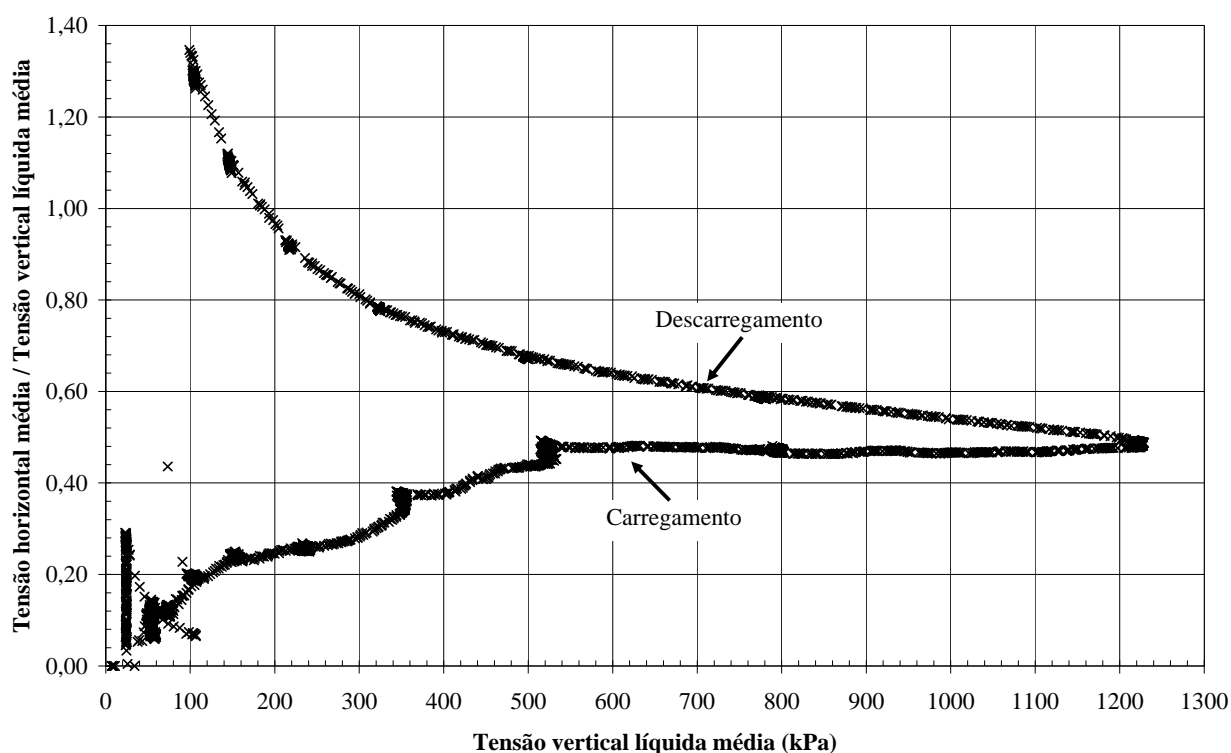


Figura 7.7 - Ensaio Barro Branco: tensão vertical líquida média vs tensão horizontal média / tensão vertical líquida média

No final dos Estágios 6 e 7 de carregamento, com tensões verticais de 350 e 520kPa, respectivamente, ocorreu aumento da tensão horizontal com tensão vertical constante, conforme observa-se nas Figuras 7.6 e 7.7. Possivelmente, a causa disso tenha sido deformações por fluência do corpo de prova decorrentes do tempo necessário para as partículas se rearranjarem e atingirem um novo estado de equilíbrio. Estas deformações sob tensão efetiva constante ficam evidentes na curva deformação vertical específica vs tensão vertical líquida média, apresentada na Figura 7.4

A inclinação da curva da Figura 7.6 fornece o coeficiente de empuxo no repouso  $K_0$ . Como a inclinação não é constante, decidiu-se por dividi-la em trechos homogêneos e calcular o  $K_0$  para cada trecho. A Figura 7.8 apresenta esta divisão, onde os limites dos trechos estão indicados por linhas tracejadas verticais. Os valores de  $K_0$  para cada trecho são apresentados na parte inferior direita da figura.

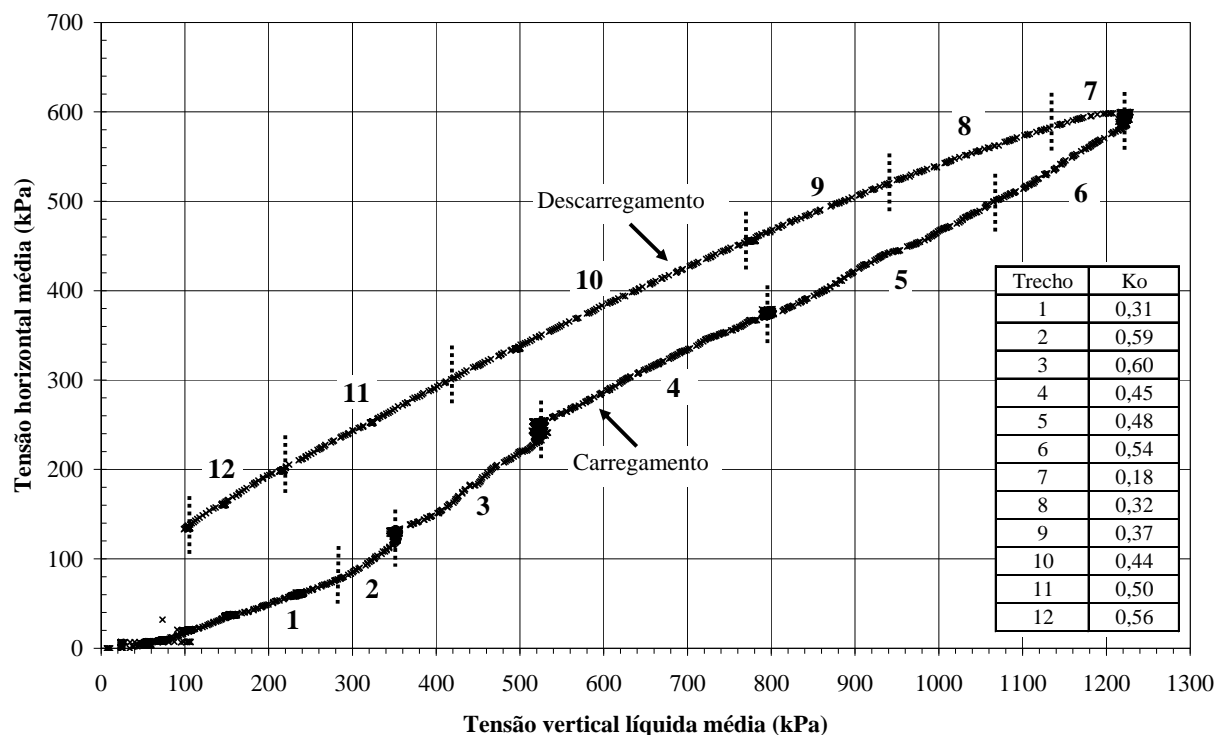


Figura 7.8 - Ensaio Barro Branco: coeficientes de empuxo no repouso  $K_0$

O  $K_0$  teve grande variação durante o carregamento, de 0,31, de 0 a 280kPa de tensão vertical, até 0,59 e 0,60, de 280 a 520kPa. Em cerca de 280kPa ocorre uma brusca mudança no  $K_0$ . Após 520kPa ocorre diminuição para 0,45, seguido de uma lenta mas contínua ascensão, até 0,54 no final do Estágio 9. Note-se que, ao contrário do que poderia sugerir os trechos 3 e 4, correspondentes aos Estágios 7 e 8, respectivamente, o  $K_0$  não é necessariamente constante ao longo de um mesmo estágio, como indica os trechos 5 e 6, ambos no Estágio 9.

No descarregamento nota-se um lento e contínuo aumento de  $K_0$ , de 0,18, no trecho 7, até 0,56, no trecho 12. Possivelmente, isso se deve à baixa velocidade de resposta do material à diminuição da carga vertical, isto é, o material necessita de certo tempo para que as tensões se equilibrem. Supõe-se que o mesmo fenômeno seja a causa das deformações lentas sob tensão efetiva constante verificadas nos estágios de carregamento.

#### 7.4.2.5. Quebra de partículas

A Figura 7.9 apresenta as curvas granulométricas do rejeito Barro Branco antes do ensaio, denominado intacto, e após o ensaio de compressão unidimensional, que se dividem em Base e Topo. O Barro Branco Topo é o material mais próximo do *top-cap*, sujeito às maiores tensões. O Barro Branco Base é o material da primeira camada compactada, na qual atuam as menores tensões verticais, já que parte da carga se perdeu por atrito com as paredes.

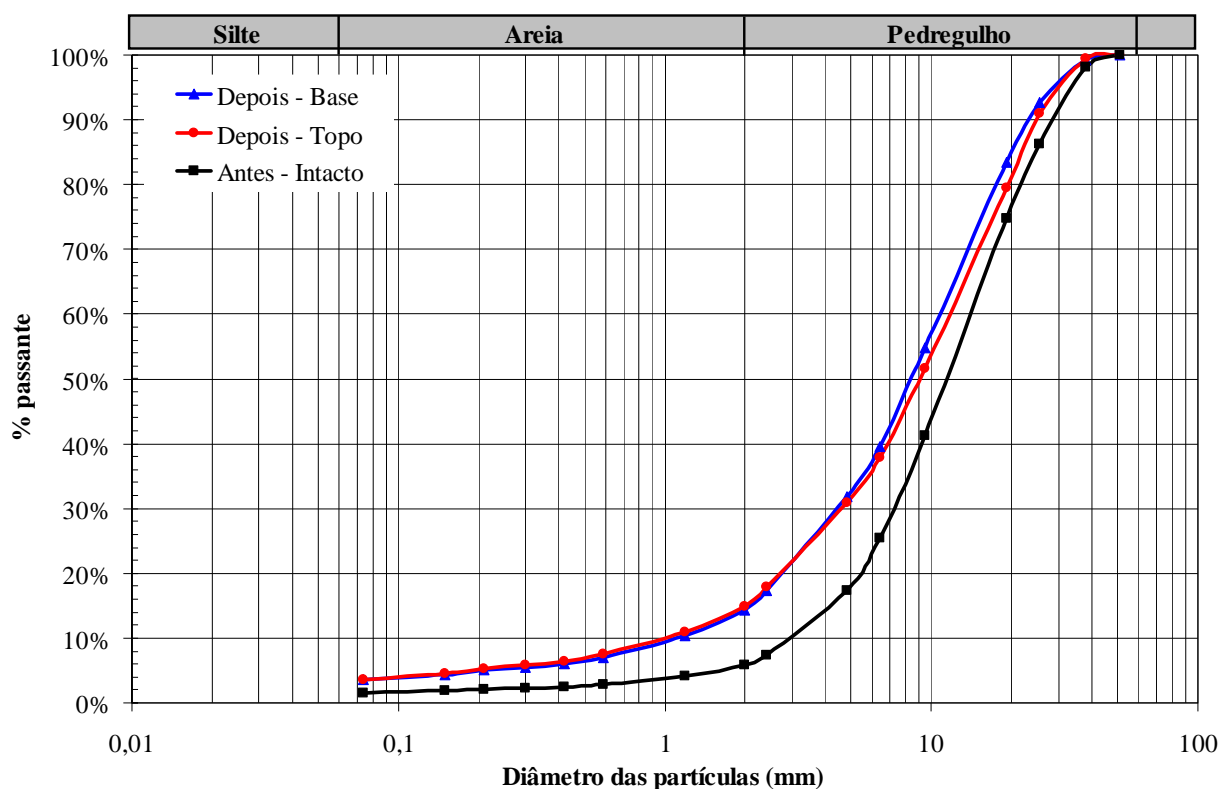


Figura 7.9 - Ensaio Barro Branco: curvas granulométricas antes e após o ensaio

A Tabela 7.11 apresenta os coeficientes de uniformidade  $C_u$  e de curvatura  $C_c$  médios.

Tabela 7.11 - Coeficiente de uniformidade  $C_u$  e de curvatura  $C_c$

Rejeito	Condição	$C_u$	$C_c$
Barro Branco	Intacto	4,7	1,2
	Ensaiado	11,0	1,8

Nota-se significativa quebra de partículas tanto do material da base como do topo, em relação ao rejeito intacto. Os graus de fraturamento  $B_g$  para topo e base são 13,4 e 14,4%, respectivamente. O fato do material de base ser ligeiramente mais fino que o de topo, resultado oposto ao esperado, é atribuído à heterogeneidade do corpo de prova.

A uniformidade do material teve alteração significativa, como demonstra a Tabela 7.11. Ao término do ensaio o material estava mais bem-graduado do que no início. O coeficiente de uniformidade  $C_u$  da amostra ensaiada, calculado a partir da curva granulométrica média dos materiais de topo e base, indica granulometria menos uniforme em relação ao material intacto.

### 7.4.3. Rejeito Bonito

#### 7.4.3.1. Força vertical total vs força de atrito total

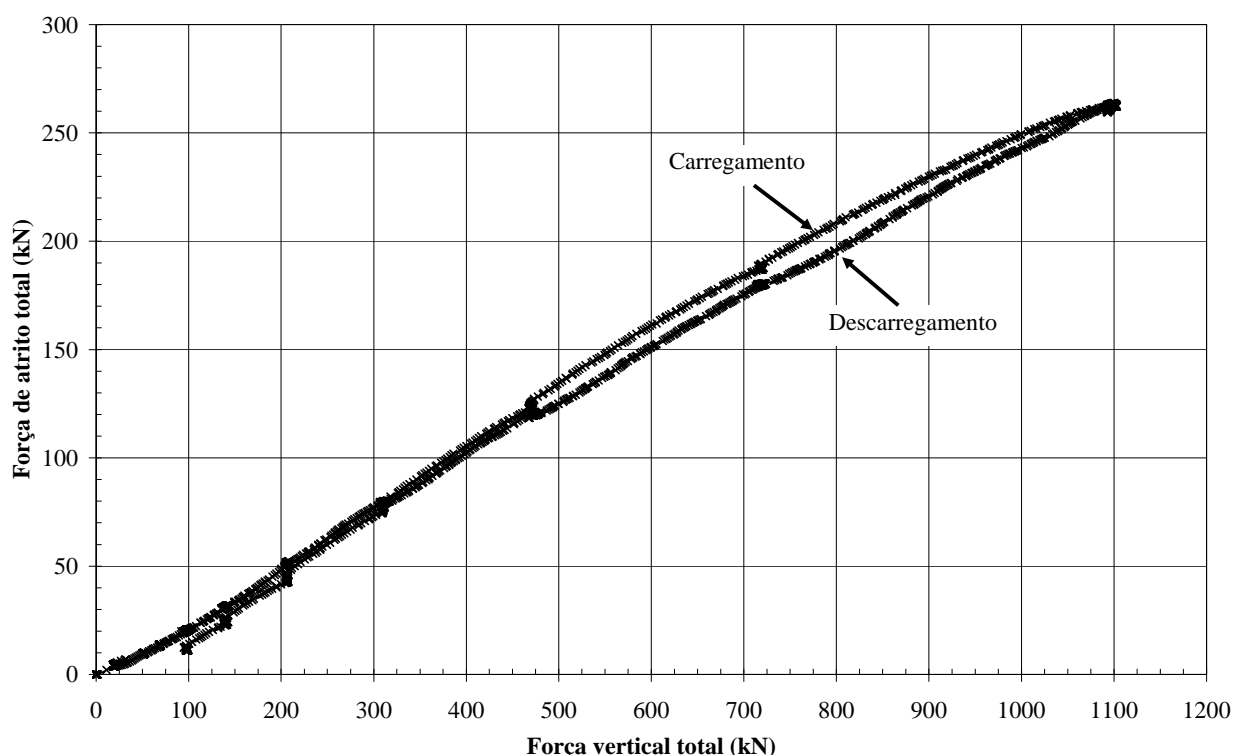


Figura 7.10 - Ensaio Bonito: força vertical total vs força de atrito total

Nota-se pela Figura 7.10 pequena diferença entre as forças de atrito totais para os estágios de carregamento e descarregamento, diferentemente do ocorrido com o rejeito Barro Branco.

No que se refere à porcentagem da força de atrito total em relação à força vertical total, indicada na Figura 7.11, até 30kN ocorreu aumento brusco até 25%, seguido de diminuição para 16%, conseqüências das dificuldades encontradas no Estágio 0, já citadas. De 30 até 250kN ocorreu aumento gradativo até de 16 até 25%, após o que ocorreu pequena variação, com máximo de 27%. Após 600kN ocorreu lenta diminuição, até cerca de 24%.

O comportamento da curva durante o descarregamento foi similar ao do carregamento, embora os percentuais de força de atrito tenham sido pouco menores. Somente abaixo de 200kN o as diferenças foram bastante acentuadas.

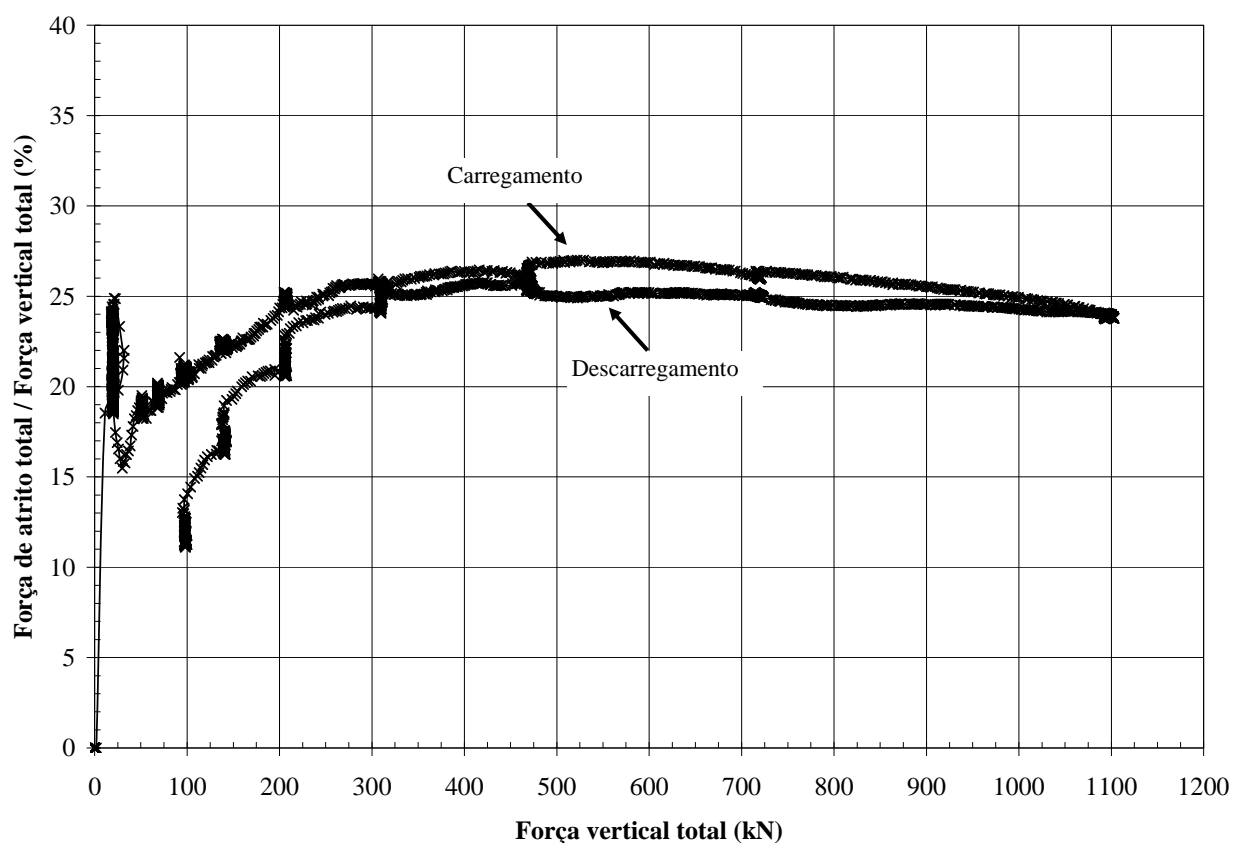


Figura 7.11 - Ensaio Bonito: força vertical total vs porcentagem da força de atrito

#### 7.4.3.2. Deformação vertical específica vs tensão vertical líquida média



Figura 7.12 - Ensaio Bonito: deformação vertical específica vs tensão vertical líquida média

Percebe-se na Figura 7.12 que a parte inicial da curva tem inclinação mais acentuada que a porção intermediária. O limite entre as duas zonas está, aproximadamente, na tensão de 120kPa. De 0 até 120kPa a deformação vertical específica é de 0,90%, enquanto no trecho seguinte, para mesmo acréscimo de tensão, a variação da deformação é de 3,9%, isto é, 4,3 vezes superior.

Do Estágio 6 ao 9 a inclinação aumenta gradualmente e de modo significativo. Esse aumento da rigidez do material deve-se, provavelmente, a grande redução do índice de vazios ocorrida até então. Nota-se ainda na Figura 7.12 grandes deformações por fluência.

No descarregamento ocorreu pequena recuperação das deformações, da aproximadamente 0,6%.

#### 7.4.3.3. Tensão vertical líquida média vs índice de vazios

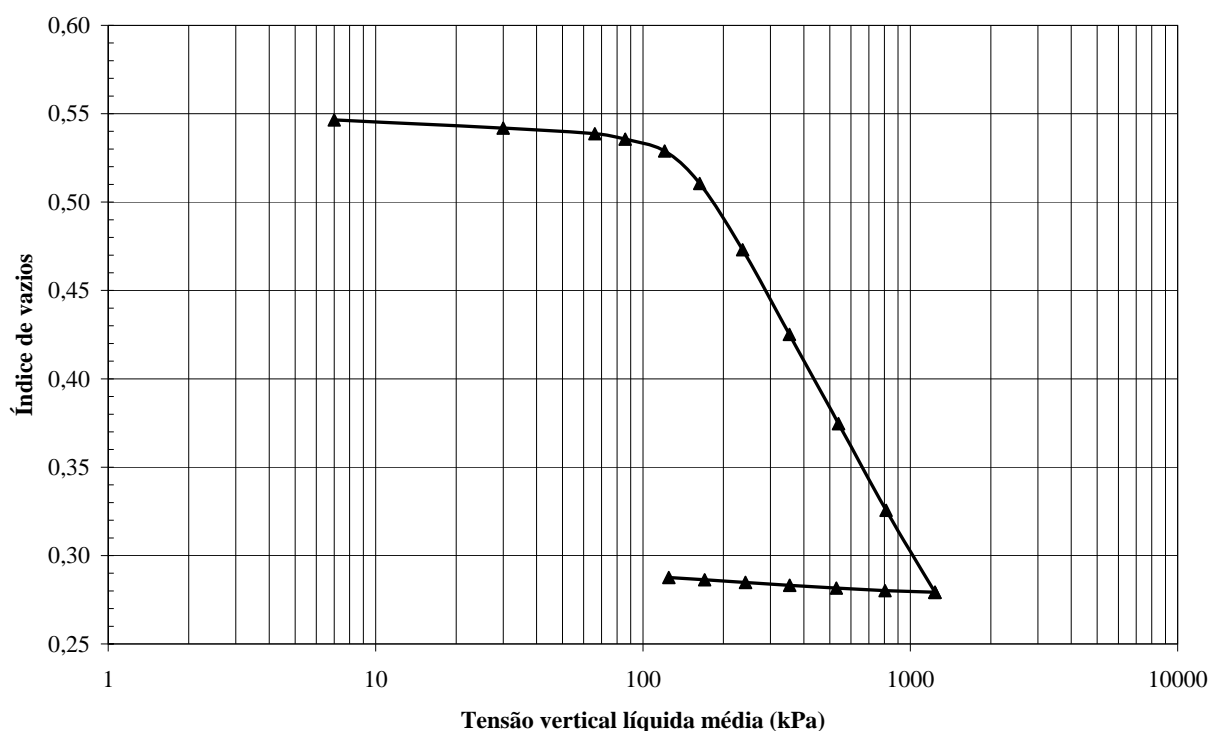


Figura 7.13 - Ensaio Bonito: tensão vertical líquida média vs índice de vazios

Percebe-se, na Figura 7.13, nitidamente um ponto de inflexão da curva de compressibilidade na tensão de aproximadamente 120kPa. A variação total do índice de vazio foi de 0,267, dos quais 0,018 ocorreu antes do ponto de inflexão e 0,249 após. Já a variação do índice de vazios na descompressão foi de 0,008. Os valores de  $C_c$  e  $C_r$  são, respectivamente, 0,263 e 0,009.

#### 7.4.3.4. Tensão vertical líquida média vs tensão horizontal média

A Figura 7.14 apresenta os resultados de tensão horizontal média, obtidos com os *strain gages*, em função da tensão vertical líquida média.

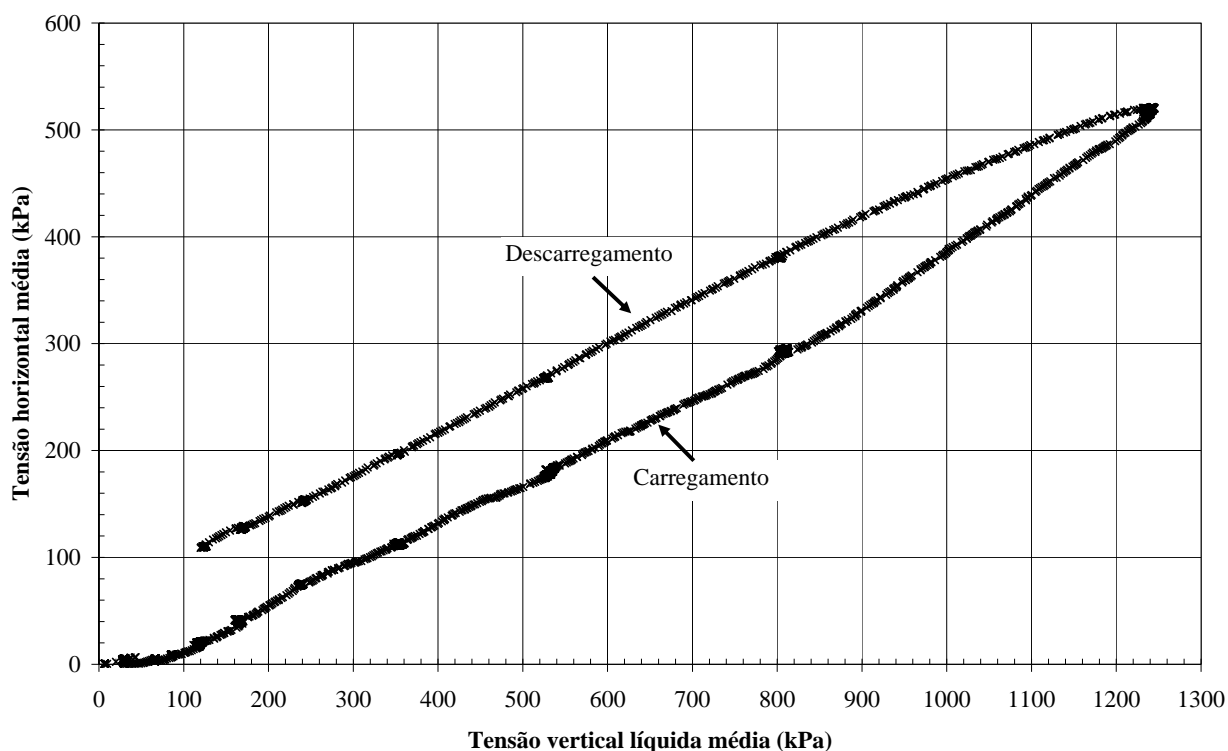


Figura 7.14 - Ensaio Bonito: tensão vertical líquida média vs tensão horizontal média

Nota-se aumento pouco significativo da tensão horizontal no período em que a tensão vertical permaneceu constante para a estabilização das deformações verticais.

As tensões horizontais no descarregamento foram significativamente superiores às do carregamento. A diferença diminui para tensões verticais acima de 830kPa e se mantém aproximadamente constante para tensões menores. A Figura 7.15 apresenta a relação entre tensões horizontais e verticais ao longo do ensaio, em função dessas últimas. Nota-se que praticamente só há aumento desta relação durante todo o ensaio, excetuando o trecho inicial.

A inclinação da curva da Figura 7.14 indica o coeficiente de empuxo no repouso  $K_0$ . Como a inclinação é variável,  $K_0$  não é constante. Dividiu-se a curva em trechos de mesma inclinação e determinou-se o  $K_0$  para cada trecho. Essa divisão e os valores de  $K_0$  de cada trecho são apresentados na Figura 7.16.

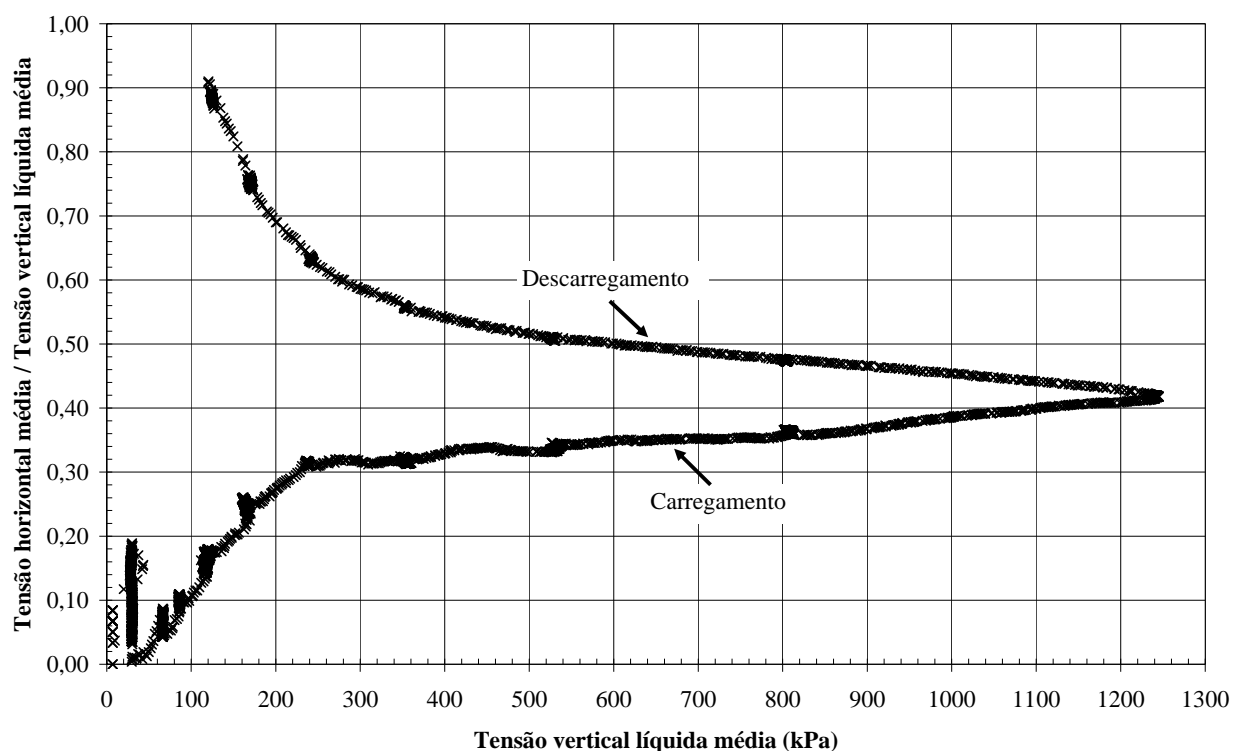


Figura 7.15 - Ensaio Bonito: tensão vertical líquida média vs tensão horizontal média / tensão vertical líquida média

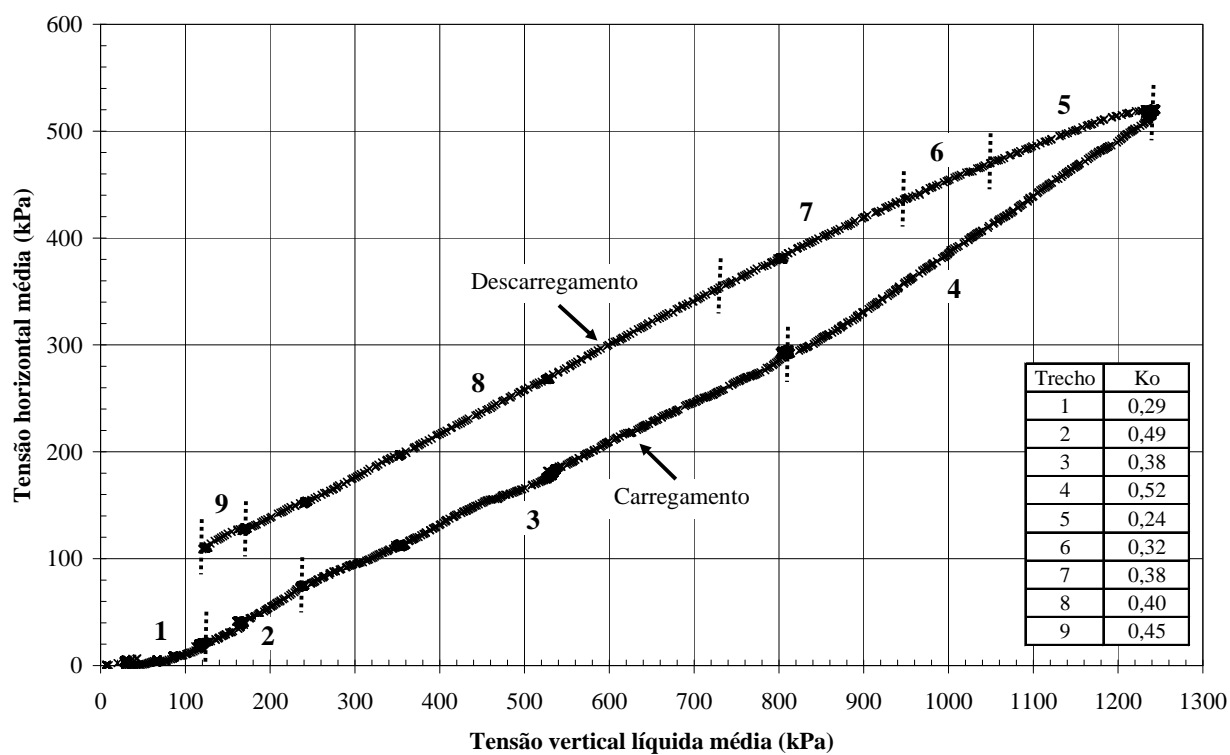


Figura 7.16 - Ensaio Bonito: coeficientes de empuxo no repouso  $K_o$



Nota-se, na Figura 7.16, que após os dois primeiros trechos de carregamento, o primeiro com  $K_o$  baixo e o outro, alto, seguem-se dois longos trechos praticamente homogêneos. O trecho 3, englobando os Estágios 6, 7 e 8, tem  $K_o$  de 0,38. O trecho 4, coincidente com o Estágio 9, tem  $K_o$  de 0,52, o mais elevado de todos.

No descarregamento ocorre lento e contínuo aumento do  $K_o$ , partindo de 0,24, no trecho 5, e atingindo 0,45, no trecho 9. Deve-se notar que os dois longos trechos 3 e 8, de carregamento e descarregamento, respectivamente, possuem inclinação muito próxima. Além disso, tanto no trecho 2 como no 9, de tensões verticais menores, a inclinação é mais acentuada e semelhante. Isto indica que, à exceção do ultimo estágio de carregamento e o primeiro de descarregamento, o  $K_o$  é muito próximo para carregamento e descarregamento.

#### 7.4.3.5. Quebra de partículas

A Figura 7.17 apresenta as curvas granulométricas do rejeito Bonito antes do ensaio, denominado intacto, e após o ensaio de compressão unidimensional, que se dividem em base e topo. O Bonito topo é o material da última camada de compactação, mais próxima do *top-cap*, e sujeita as maiores tensões. O Bonito Base é o material da primeira camada, na qual as tensões são menores.

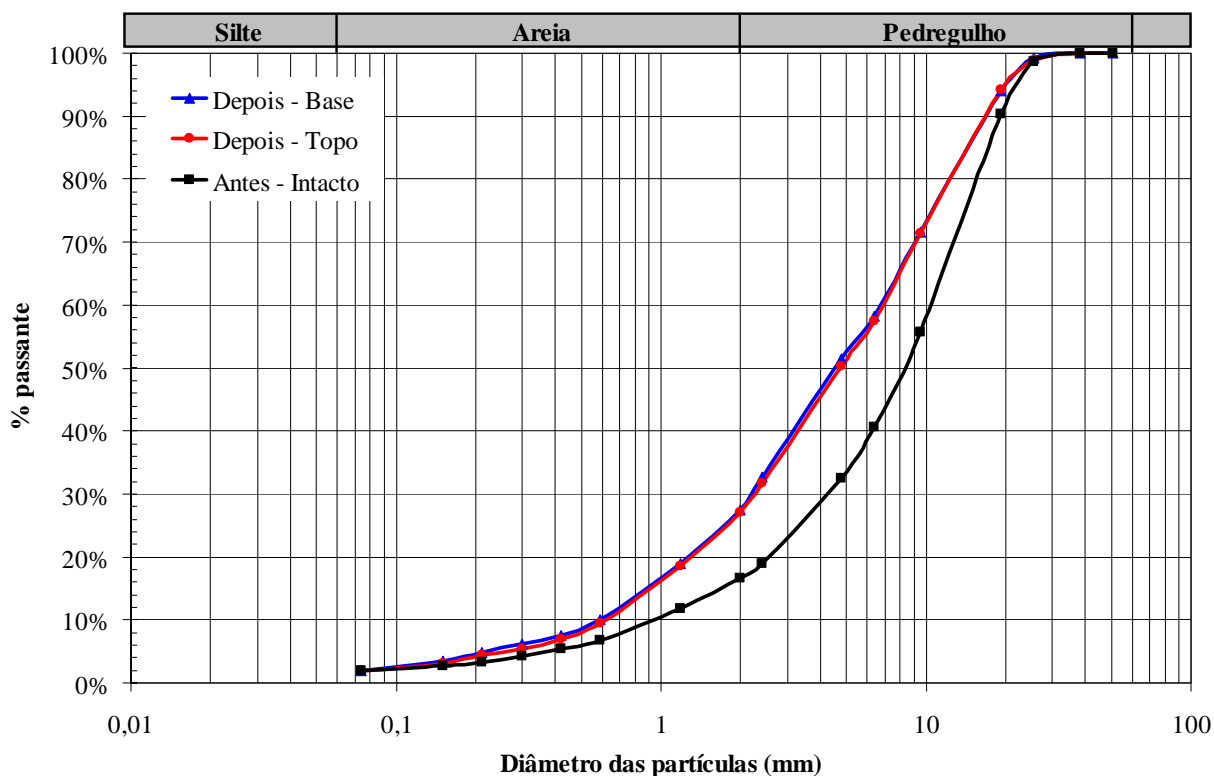


Figura 7.17 - Ensaio Bonito: curvas granulométricas antes e após o ensaio

A Tabela 7.12 indica os coeficientes de uniformidade Cu e de curvatura Cc médios.

Tabela 7.12 – Coeficiente de uniformidade Cu e de curvatura Cc

Rejeito	Condição	Cu	Cc
Bonito	Intacto	11,0	1,9
	Ensaiado	11,9	1,2

Nota-se que ocorreu significativa quebra de partículas durante o ensaio, com sensível aumento das frações pedregulho fino e areia grossa tanto na amostra de topo como na de base, que tiveram curvas granulométricas semelhantes. Os graus de fraturamento Bg para topo e base são de 17,8 e 19,0%, respectivamente.

#### 7.4.4. Análise comparativa

A Figura 7.18 apresenta as curvas deformação vertical específica *versus* tensão vertical líquida média, dos dois materiais ensaiados.

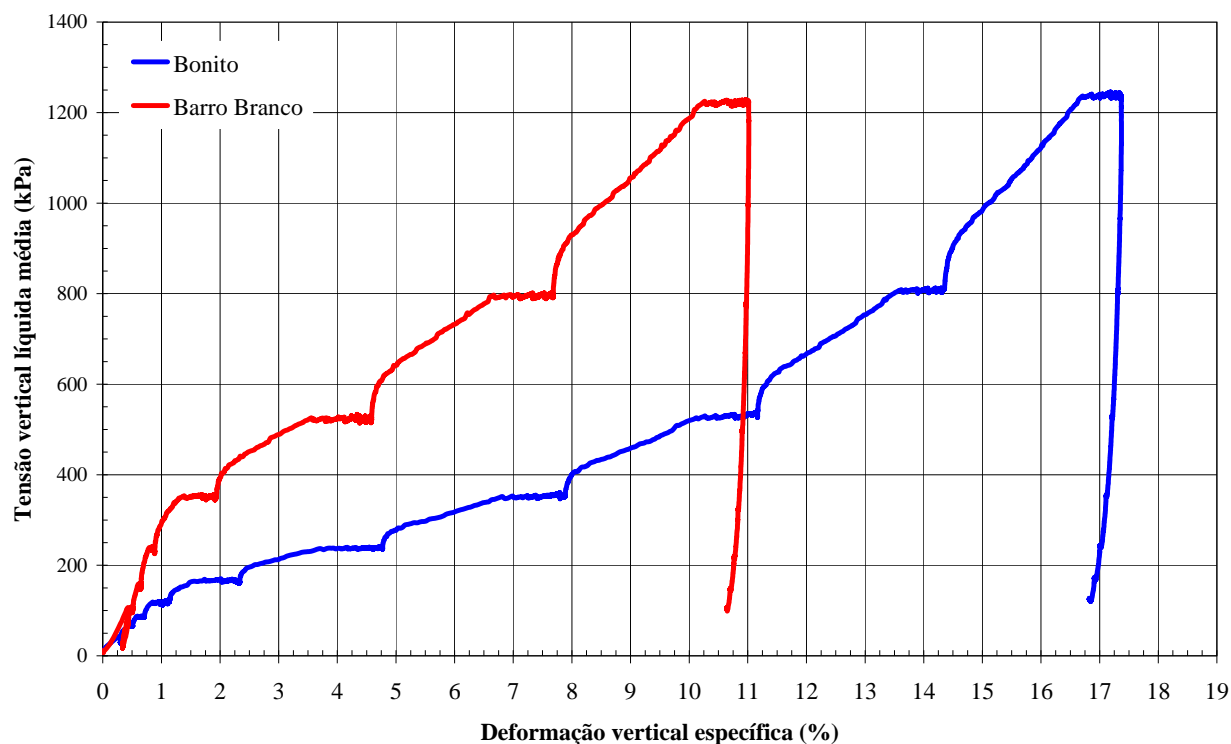


Figura 7.18 - Comparação: deformação vertical específica vs tensão vertical líquida média

A deformação vertical específica máxima atingida pelo rejeito Bonito, de 17,4%, foi significativamente maior que a atingida pelo rejeito Barro Branco, de 11,0%. Essa tendência ocorreu em todos os estágios de carregamento, à exceção do Estágio 9, onde para mesma variação da tensão vertical, de 440kPa, a variação da deformação vertical específica foi maior para o rejeito Barro Branco, de 3,3%, do que para o Bonito, de 3,0%. Possivelmente, a causa dessa diminuição de compressibilidade do rejeito Bonito em relação ao Barro Branco seja devido à elevada diferença na redução do índice de vazios ocorrida até o Estágio 8, de 0,216 e 0,120, respectivamente. Esta diferença de compressibilidade também pode ser observada na Figura 7.19.

As diferenças nas inclinações do treco inicial e nas tensões correspondentes aos pontos de inflexão das curvas da Figura 7.18 foram significativas. O rejeito Barro Branco apresentou maior rigidez (maior relação tensão / deformação) até o último estágio de carregamento.

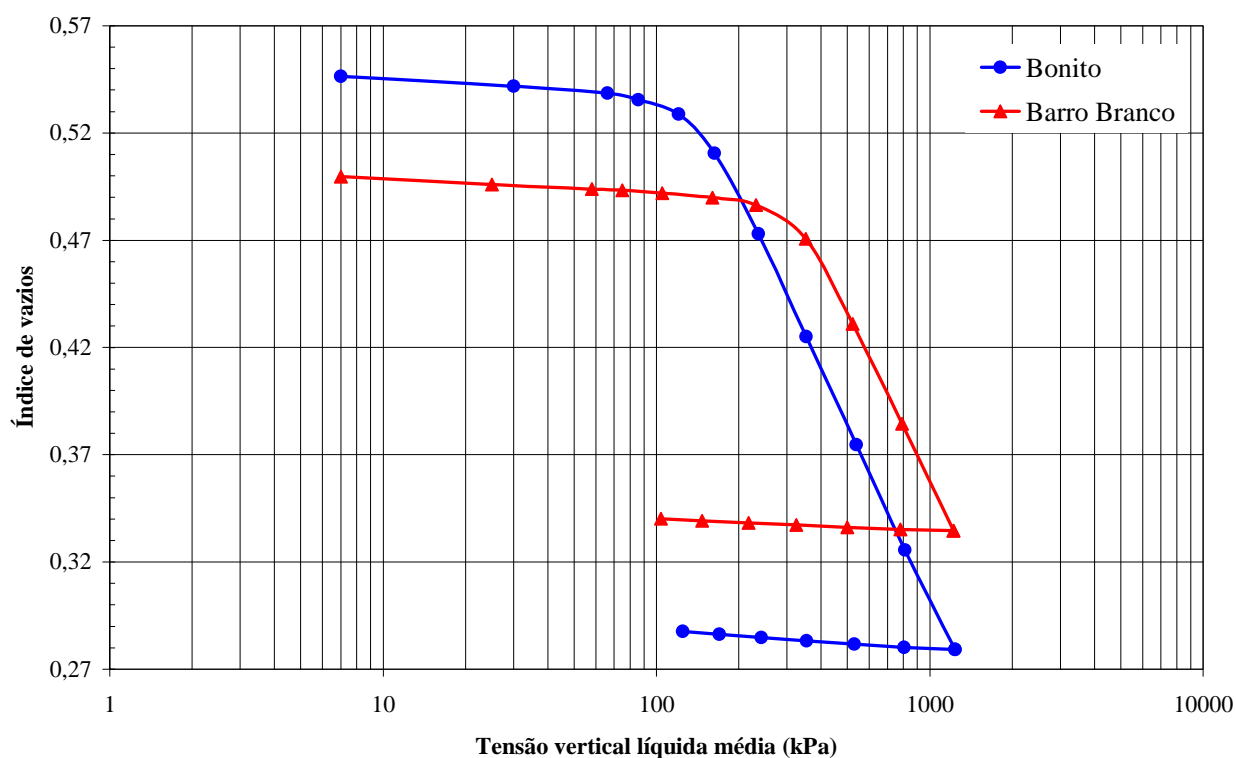


Figura 7.19 - Comparação: tensão vertical líquida média vs índice de vazios

Na Figura 7.19, as tensões correspondentes aos pontos de inflexão dos estágios de carregamento foram significativamente diferentes: 120kPa para o rejeito Bonito e 300kPa para o Barro Branco. Já os valores de  $C_c$  ficaram muito próximos: 0,263 para o rejeito Bonito e 0,252 para o Barro Branco. Nos valores de  $C_r$  a diferença relativa (percentual) foi mais acentuada: 0,009 para o rejeito Bonito e 0,006 para o Barro Branco.

A Figura 7.20 apresenta as tensões horizontais médias em função das tensões verticais líquidas médias para os dois ensaios.

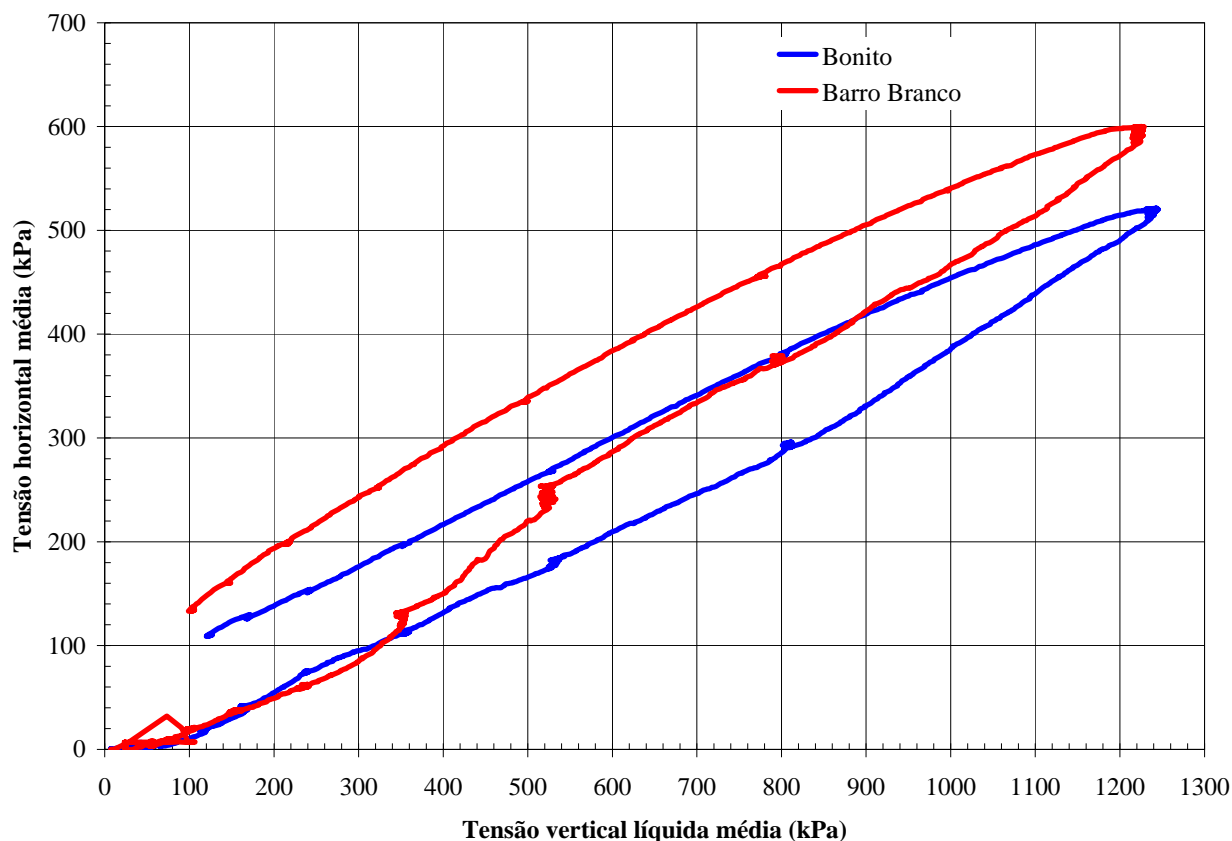


Figura 7.20 - Comparação: tensão vertical líquida média vs tensão horizontal média

No carregamento, para tensões verticais abaixo de 300kPa e acima de 520kPa a inclinação das duas curvas é semelhante. Nos dois materiais foi verificada a tendência de aumento de  $K_0$  após 800kPa, muito embora isso tenha sido mais acentuado no rejeito Bonito.

Entre 300 e 520kPa o  $K_0$  do rejeito Barro Branco foi de 0,60, bem superior ao do Bonito, de 0,38. Além disso, nesta faixa de tensões o Barro Branco apresentou significativo aumento de tensão horizontal com tensão vertical constante. Este fenômeno foi pouco expressivo para outras faixas de tensão, excetuando o final do Estágio 9. Por outro lado, já foi evidenciado que as curvas das Figuras 7.18 e 7.19, para o ensaio Barro Branco, apresentam significativos pontos de inflexão quando a tensão vertical é da ordem de 300 a 350kPa. A partir deste ponto ocorre diminuição de rigidez, isto é, maiores deformações para mesmo acréscimo de tensão. Acredita-se que a diminuição da rigidez faz com que o material tenda a se deslocar horizontalmente. Mas como a célula de compressão impede este deslocamento, ocorre aumento das tensões horizontais

e, portanto, aumento do coeficiente de empuxo no repouso  $K_0$ . Possivelmente, a quebra de partículas seja a causa deste fenômeno.

Comparando-se as Figuras 7.18 e 7.20 conclui-se que não há relação direta entre aumento de tensão horizontal com tensão vertical constante e deformações por fluência. No rejeito Bonito estas últimas foram significativas do Estágio 4 ao 9 de carregamento e, no entanto, o aumento de tensão horizontal foi insignificante. Já o Barro Branco teve deformações por fluência importantes do Estágio 6 ao 9 e somente nos 6 e 7 ocorreu aumento expressivo da tensão horizontal.

No descarregamento os materiais apresentaram comportamento semelhante, com aumento lento, mas significativo do  $K_0$ .

A Figura 7.21 compara as forças de atrito total durante o carregamento.

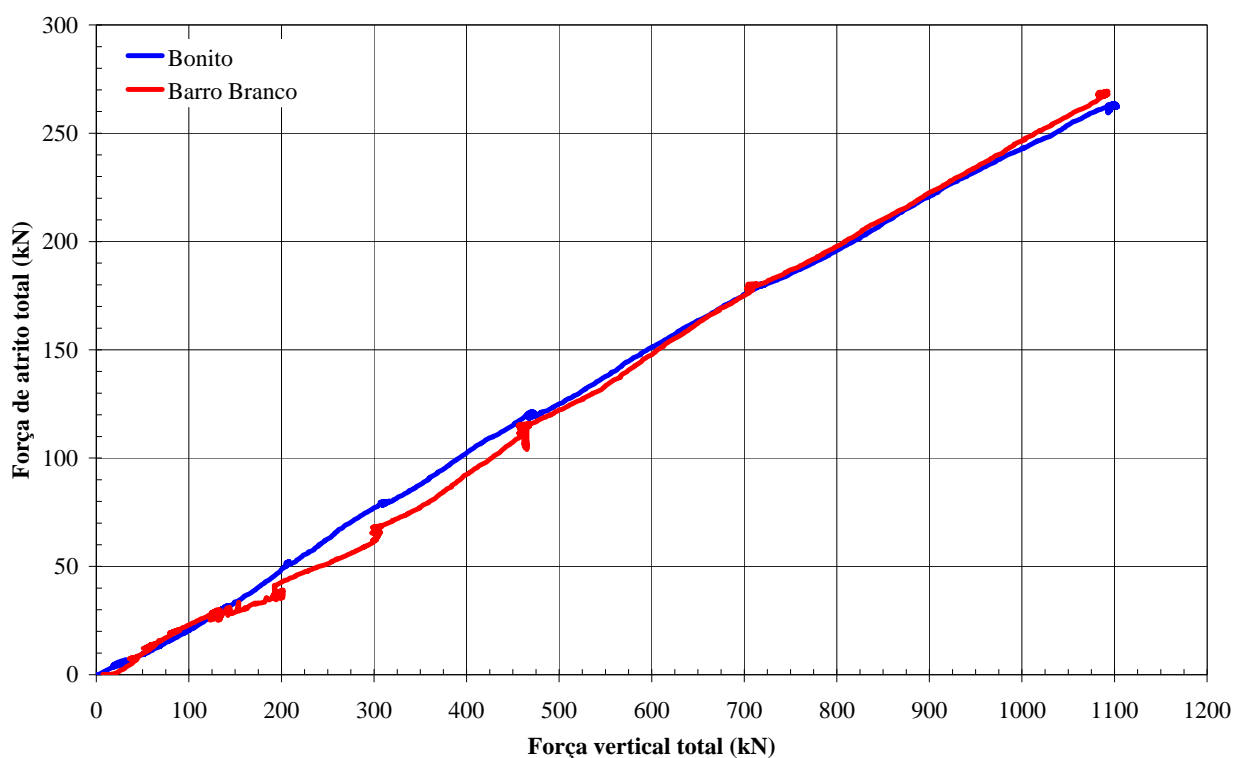


Figura 7.21 - Comparação: força vertical total vs força de atrito total para estágios de carregamento

As forças de atrito totais em grande parte dos estágios de carregamento foram bastante semelhantes para os dois ensaios. Somente para tensões verticais entre 150 e 480kPa a diferença foi significativa. Poder-se-ia esperar que o ensaio com rejeito Barro Branco apresentasse forças de atrito totais mais elevadas já que as tensões horizontais nas paredes de célula foram mais significativas, em relação ao ensaio com rejeito Bonito, conforme demonstra a Figura 7.20. Porém, deve-se notar que as deformações verticais específicas foram menores no ensaio Barro

Branco (ver Figura 7.18) É possível que estas não tenham sido suficientes para mobilizar totalmente as forças de atrito. Outra possibilidade é do ângulo de atrito entre o rejeito Barro Branco e a parede interna da célula ser menor em relação ao Bonito. Deve-se ainda considerar a possibilidade de ocorrência dos dois fenômenos simultaneamente. A Figura 7.22 apresenta comparação das porcentagens de forças de atrito.

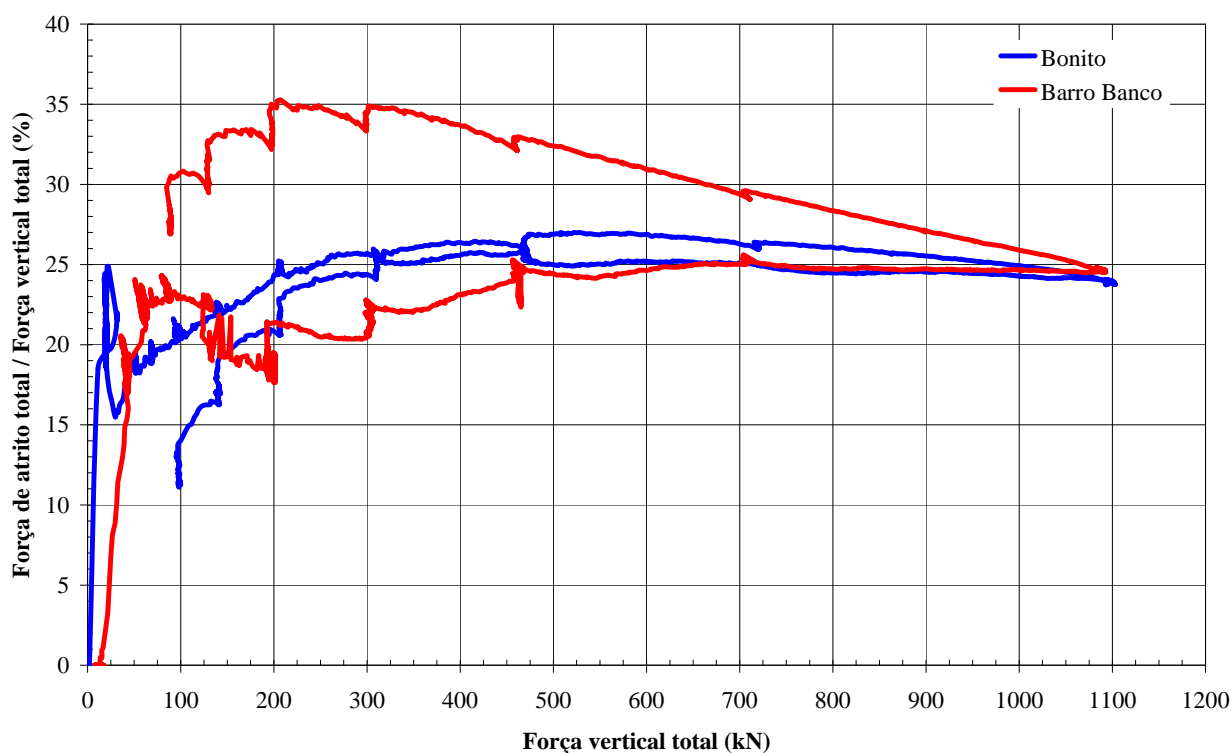


Figura 7.22 - Comparação: força vertical total vs porcentagem da força de atrito

#### 7.4.5. Ensaios com modelação física

Foram realizados ensaios de compressão unidimensional em célula de pequenas dimensões, com corpos de prova de 85mm de diâmetro e 37mm de altura. Como não foi possível utilizar a granulometria de campo, com partículas de até 75mm, fez-se a modelação da mesma compondo curva granulométrica paralela à de campo, com partículas de até 7,9mm de diâmetro. A relação entre a menor dimensão do corpo de prova e o maior diâmetro de partículas foi de 4,7. Os corpos de prova possuíam mesma massa específica aparente seca e teor de umidade dos ensaios de grandes dimensões. A litologia também era a mesma.

As curvas de compressibilidade obtidas para os dois tipos de rejeito são apresentadas na Figura 7.23.

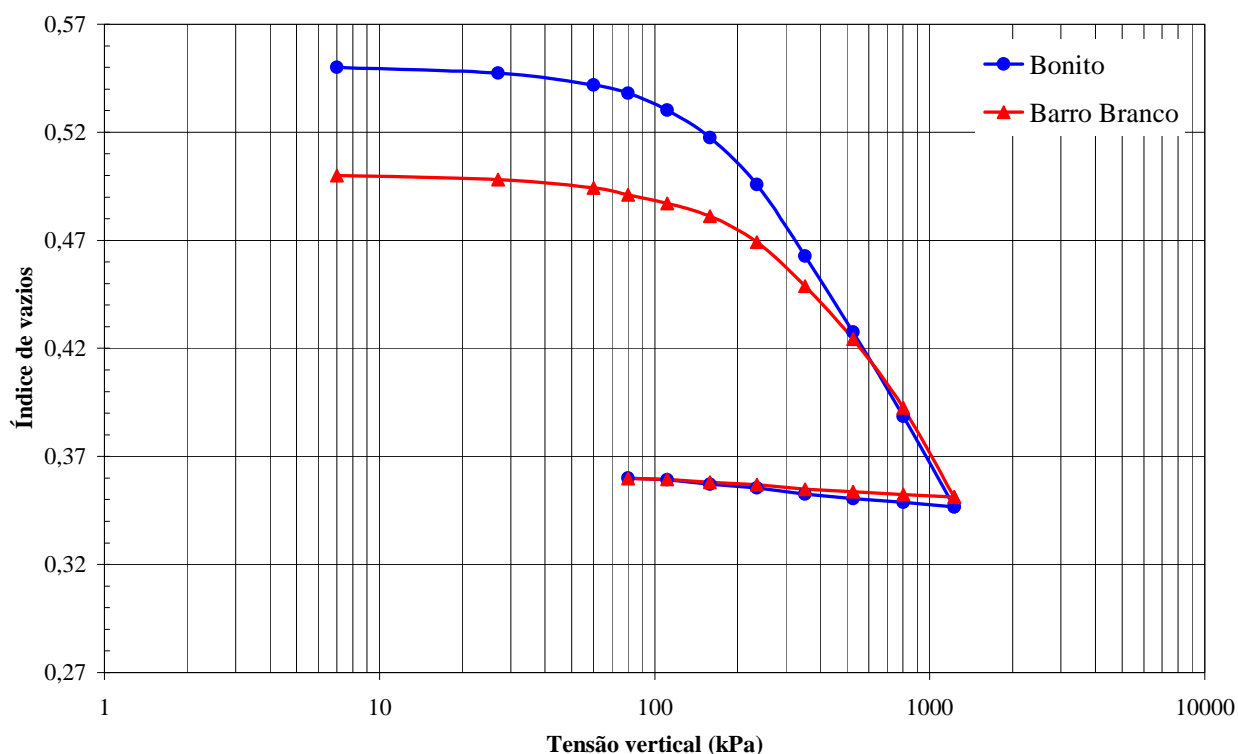


Figura 7.23 - Ensaio de pequenas dimensões: tensão vertical vs índice de vazios

As duas curvas não possuem ponto de inflexão bem definido, porém ele se encontra entre 100 e 200kPa para o rejeito Bonito e entre 200 e 300kPa para o Barro Branco. Além disso, no último estágio de carregamento as inclinações das curvas são semelhantes. Neste trecho o  $C_c$  do Bonito é 0,226 enquanto o do Barro Branco é 0,223.

#### 7.4.6. Comparação entre ensaios de grandes e pequenas dimensões

As Figuras 7.24 e 7.25 apresentam as curvas de compressibilidade dos ensaios grandes e pequenos. Em ambos os materiais os corpos de prova pequenos indicaram menor compressibilidade total que os grandes. No rejeito Bonito a diferença foi mais significativa do que no Barro Branco. Acredita-se que isto é devido a menor quebra de partículas dos ensaios pequenos, já que partículas de menor dimensão resultam em menores forças de contato, considerando a mesma tensão vertical. Portanto, são necessárias maiores tensões verticais para atingir o mesmo grau de fraturamento  $B_g$ .

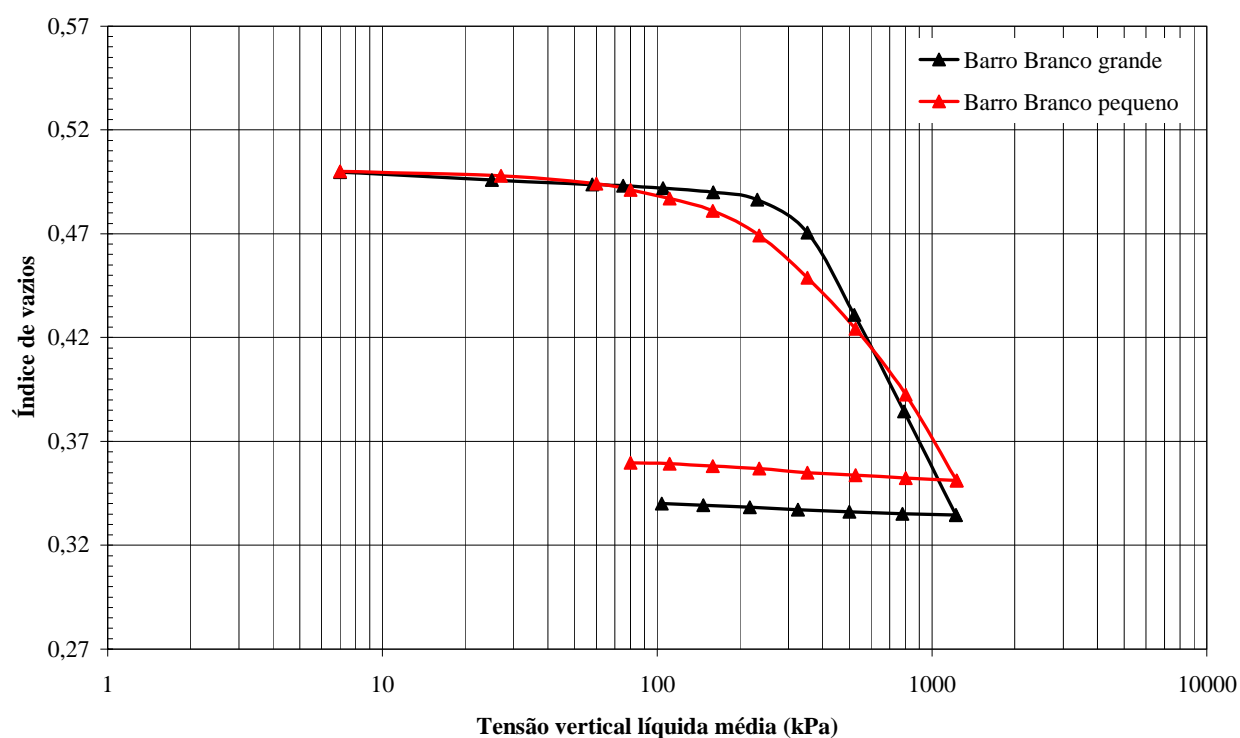


Figura 7.24 - Ensaios Barro Branco grande e pequeno: tensão vertical vs índice de vazios

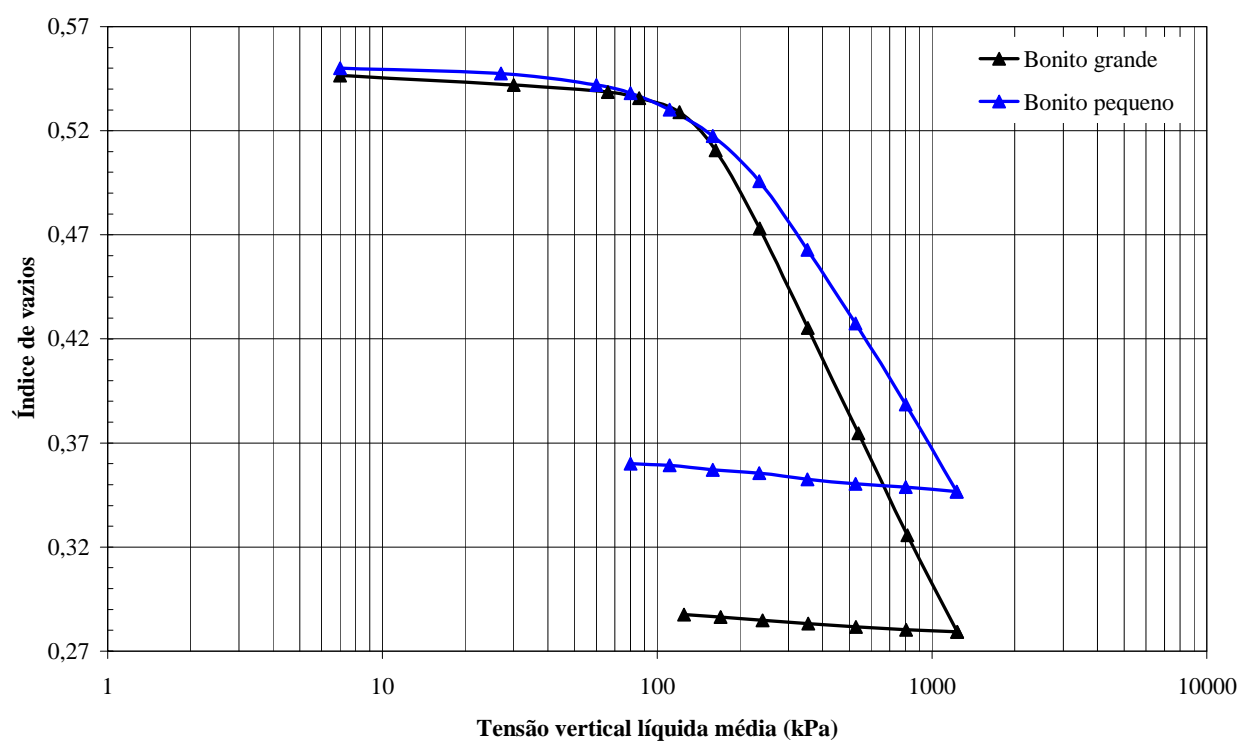


Figura 7.25 - Ensaios Bonito grande e pequeno: tensão vertical vs índice de vazios



Os ensaios Barro Branco apresentaram comportamento similar nos trechos iniciais e finais. Nestes últimos, o  $C_c$  do ensaio pequeno tende para valores semelhantes aos do grande, de 0,269. Todavia para tensões intermediárias, entre 100 e 800kPa, os comportamentos foram distintos, com o ensaio pequeno indicando menor tensão correspondente ao ponto de inflexão. Além disso, para tensões verticais menores que 600kPa o corpo de prova pequeno apresentou maior compressibilidade, enquanto que para tensões maiores ocorreu o oposto.

Os corpos de prova Bonito apresentaram comportamento semelhante até tensão de 120kPa, aproximadamente. As tensões normais correspondentes aos pontos de inflexão são semelhantes. Para tensões maiores que 120kPa, o corpo de prova pequeno apresentou menor compressibilidade. Os valores de  $C_c$  para os ensaios Bonito pequeno e grande são 0,213 e 0,263, respectivamente.

## **7.5. ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO DE GRANDES DIMENSÕES**

### **7.5.1. Introdução**

Primeiramente serão apresentados e analisados separadamente os resultados dos cinco ensaios de cisalhamento direto executados. Após serão comparados os principais dados obtidos. Por último será apresentada a envoltória de ruptura. Como já citado, foram realizados ensaios somente com rejeito Barro Branco. Os corpos de prova estavam parcialmente saturados, com umidade de campo (ver item 7.2).

Também são apresentados resultados de ensaios obtidos com equipamentos de pequenas dimensões, utilizando curvas granulométricas paralelas às de campo. Esses resultados são comparados com os de grandes dimensões.

Os ensaios de grandes dimensões foram denominados BB 100, BB 270, BB 350, BB 430 e BB 600. As letras “BB” indicam que o rejeito ensaiado foi Barro Branco. Os números indicam as tensões normais totais verticais aplicadas para consolidação dos corpos de prova, em kPa.

Os resultados serão apresentados na forma dos seguintes gráficos:

1 - Tempo vs deformação vertical específica média vs tensão normal vertical total, para o estágio de consolidação dos corpos de prova. Optou-se por apresentar num mesmo gráfico as variações de tensão normal e de deformação vertical em função do tempo devido à interdependência das duas primeiras. Como já citado no Capítulo 4, ocorreu, em alguns casos, significativa variação da tensão normal de consolidação. Nos valores de tensão normal total não estão descontadas as perdas de carga por atrito entre o corpo de prova e as paredes internas da caixa de cisalhamento;

ela corresponde, portanto, à tensão efetiva atuante no topo dos corpos de prova. As deformações verticais específicas correspondem às médias dos três transdutores de deslocamento. Cabe ressaltar que as medidas de deformação vertical não são totalmente confiáveis, porque parte delas corresponde à penetração das ranhuras da chapa de topo no corpo de prova, de difícil quantificação.

2 - Deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante vs tensão normal total, para o estágio de cisalhamento. Foram também indicados os deslocamentos horizontais no gráfico. Para determinação da tensão cisalhante foi utilizada a área corrigida do plano de ruptura, calculada a partir dos deslocamentos horizontais. Colocou-se num mesmo gráfico tensões cisalhantes e tensões normais totais para facilitar a análise dos dados, pois a primeira é dependente da segunda.

3 - Deformação cisalhante específica vs deformação vertical específica média vs ângulo de rotação do *top-cap*. Acredita-se que no início do estágio de cisalhamento grande parte das ranhuras da chapa de topo já havia penetrado no corpo de prova, diminuindo os erros de medição de deformações verticais. No entanto, ainda não é possível garantir sua confiabilidade. Todavia, acredita-se que estas medidas são mais confiáveis para tensões normais mais elevadas.

4 - Curvas de distribuição granulométrica após os ensaios. Essas curvas foram determinadas para amostras retiradas das partes inferior, central e superior de cada corpo de prova ensaiado, sendo denominadas amostras de base, meio e topo, respectivamente.

5 – Envoltória de ruptura, seguindo proposta de de Mello (1977) e adotando critérios de deformação cisalhante.

### **7.5.2. Ensaio BB 100**

A seguir são apresentados e analisados os resultados do ensaio BB 100, executado com tensão normal total de consolidação de, aproximadamente, 100kPa.

A Figura 7.26 corresponde ao estágio de consolidação do corpo de prova. No tempo 9 minutos percebe-se súbita elevação da tensão normal, de 98,1 para 109,1kPa. Como já citado, a causa disso foi o controle manual do sistema hidráulico do pistão vertical (ver item 4.3). Nota-se que as deformações verticais aumentaram rapidamente, para, em seguida, voltarem a estabilizar.

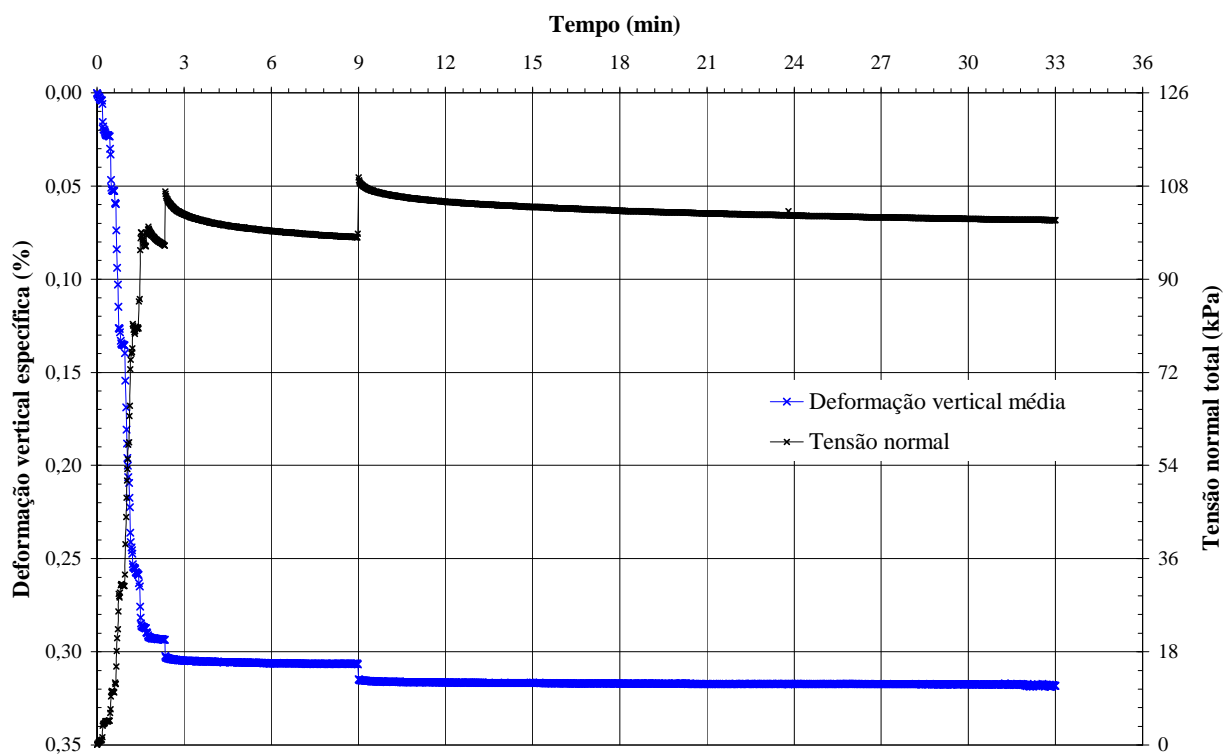


Figura 7.26 - Ensaio BB 100: tempo vs deformação vertical específica média vs tensão normal total

A Figura 7.27 corresponde ao estágio de cisalhamento.

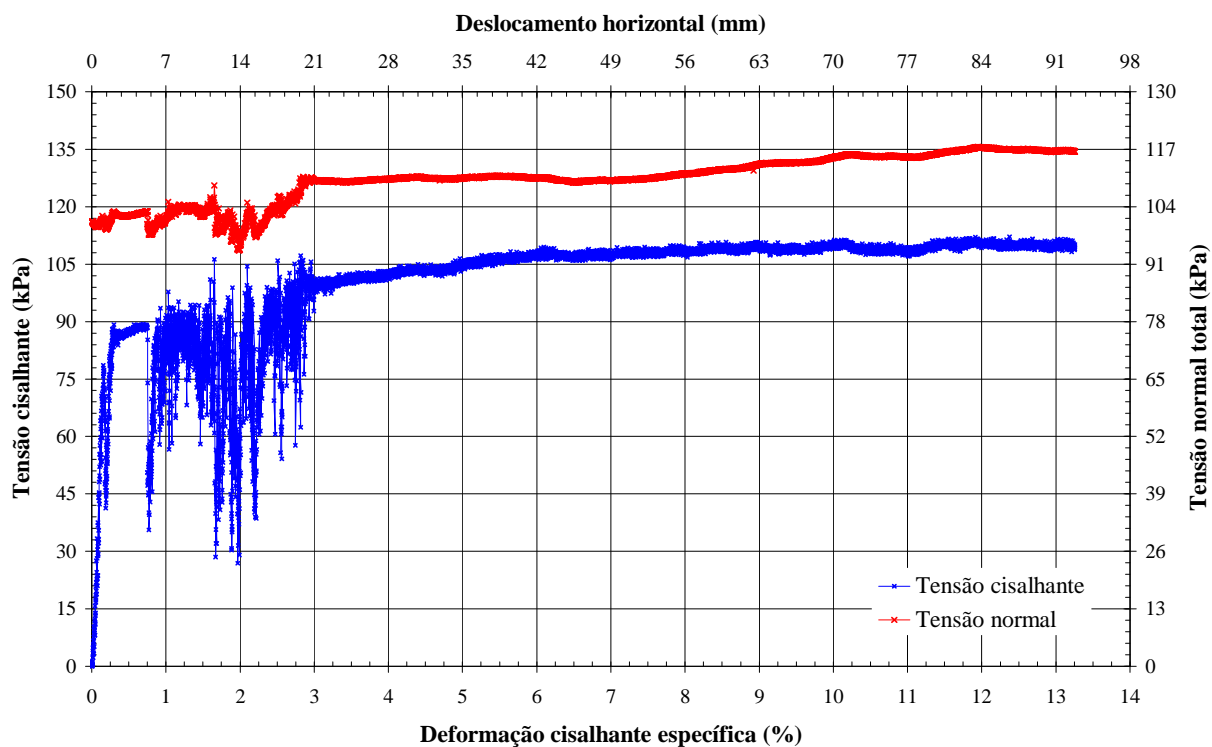


Figura 7.27 - Ensaio BB 100: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante vs tensão normal total

Verifica-se na Figura 7.27,

- 1 – Significativo aumento da tensão cisalhante com pequenas deformações no início do cisalhamento. Com 0,3% de deformação cisalhante (2,1mm) a tensão cisalhante era de 89kPa (81% da máxima atingida, de 110kPa).
- 2 – Ponto de inflexão bem definido na curva da tensão cisalhante, em 89kPa. O material mudou abruptamente seu comportamento.
- 3 – Grande oscilação da tensão cisalhante entre deformações de 0,7 e 3,0%, de 27 até 106kPa.
- 4 – Variação significativa da tensão normal total durante o ensaio, principalmente até deformação de 3%. Após 7,5% ocorreu lento aumento, devido à manutenção da força vertical constante e a progressiva diminuição da área do plano de ruptura (ver item 4.3.3).

Na Figura 7.28 são apresentadas as deformações verticais específicas médias durante o cisalhamento. Valores positivos indicam redução de volume e negativos, aumento.

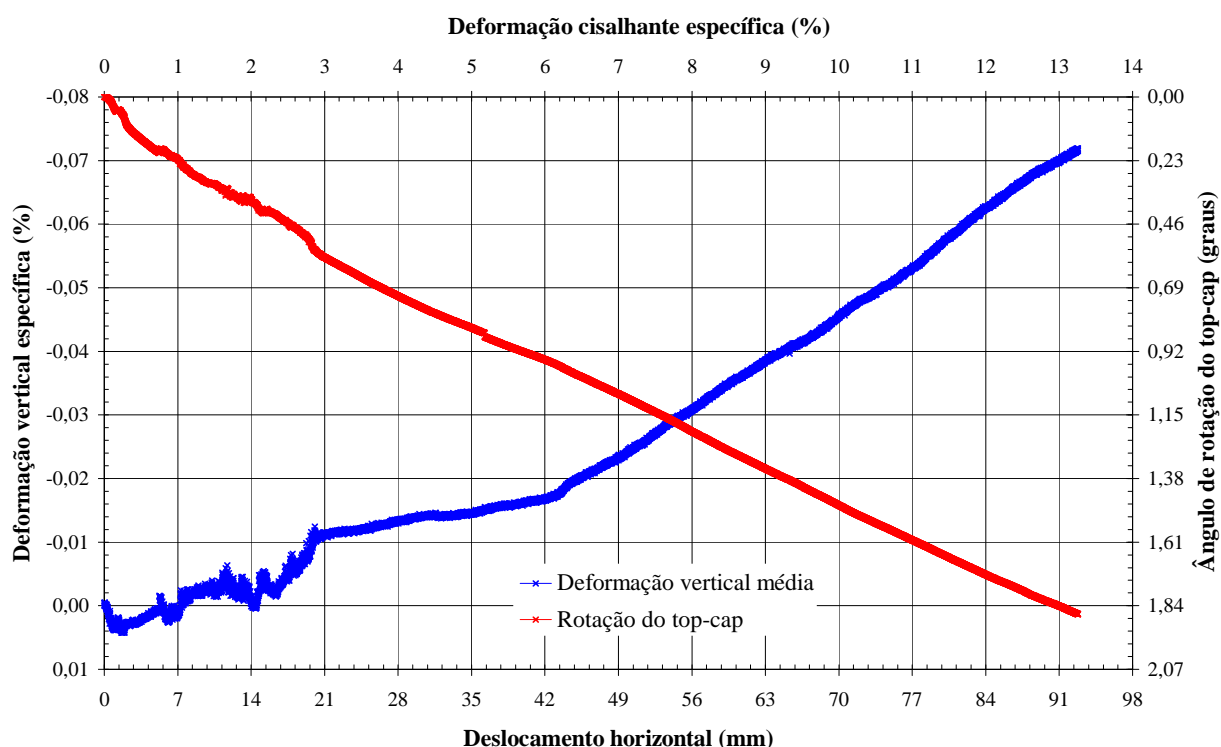


Figura 7.28 - Ensaio BB 100: deformação cisalhante específica vs deformação vertical específica média vs ângulo de rotação do *top-cap*

Nota-se, na Figura 7.28, pequeno aumento médio de volume do corpo de prova, de até 0,072%, no final do ensaio. A significativa oscilação da deformação vertical média entre 0 e 3,0% provavelmente está associada à variação das tensões normal e cisalhante da Figura 7.27.

Após 3% surgem dois trechos aproximadamente lineares com inclinações bastante diferentes. O primeiro ocorre entre 3,0 e 6,2% e o segundo de 6,2 a 13,2%. Ambos parecem estar associados à mudança de inclinação da curva deformação cisalhante vs tensão cisalhante da Figura 7.27, que ocorreram em deformações cisalhantes semelhantes. A variação do ângulo de rotação do top-cap em função do deslocamento horizontal foi praticamente linear.

A Figura 7.29 apresenta as curvas granulométricas do rejeito antes do ensaio (intacto) e após, de amostras retiradas no topo, meio e base do corpo de prova cisalhado. No plano de ruptura, onde as partículas foram mais solicitadas, a quebra foi mais significativa em relação a topo e base. A maior quebra no topo em relação à base deve-se, provavelmente, à diminuição da tensão normal do topo para a base, decorrente das perdas de carga por atrito lateral.

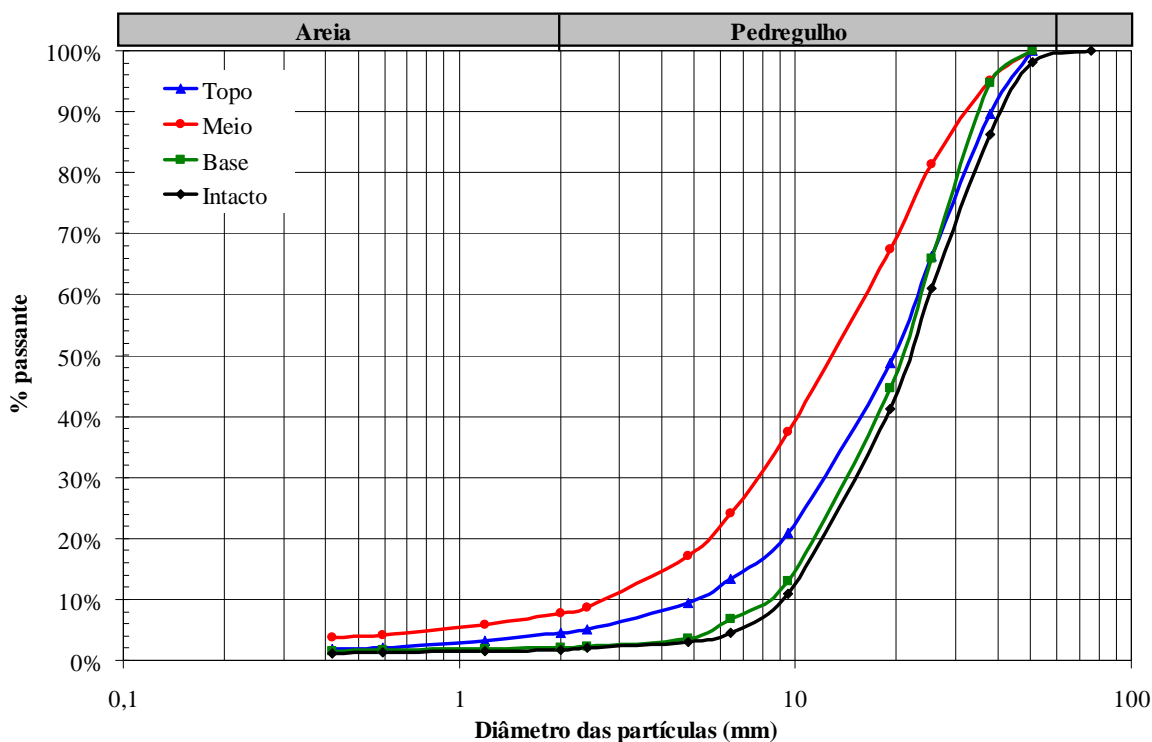


Figura 7.29 - Ensaio BB 100: curvas de distribuição granulométrica antes e depois do ensaio

A Tabela 7.13 apresenta os coeficientes de uniformidade  $C_u$  e curvatura  $C_c$  e o grau de fraturamento  $B_g$  das amostras antes e após o ensaio.

Tabela 7.13 - Ensaio BB 100: coeficientes de uniformidade e curvatura e grau de fraturamento

Amostra	Cu	Cc	Bg (%)
Intacto	2,6	1,1	-
Topo	4,3	1,1	9,9
Meio	6,4	1,4	26,5
Base	2,6	1,1	9,3

### 7.5.3. Ensaio BB 270

Nota-se na Figura 7.30 significativa redução da tensão normal durante a consolidação, de 270 para 38kPa. Isso foi causado por problemas operacionais durante do ensaio. Apesar da redução e do aumento da tensão ter ocorrido em apenas 7 minutos, aproximadamente, ocorreu significativa recuperação das deformações verticais, de 0,66 para 0,34%. Mesmo levando em consideração as imprecisões de medidas neste tipo de ensaio, já citadas, isso sugere que grande parte das deformações até então ocorridas eram elásticas.

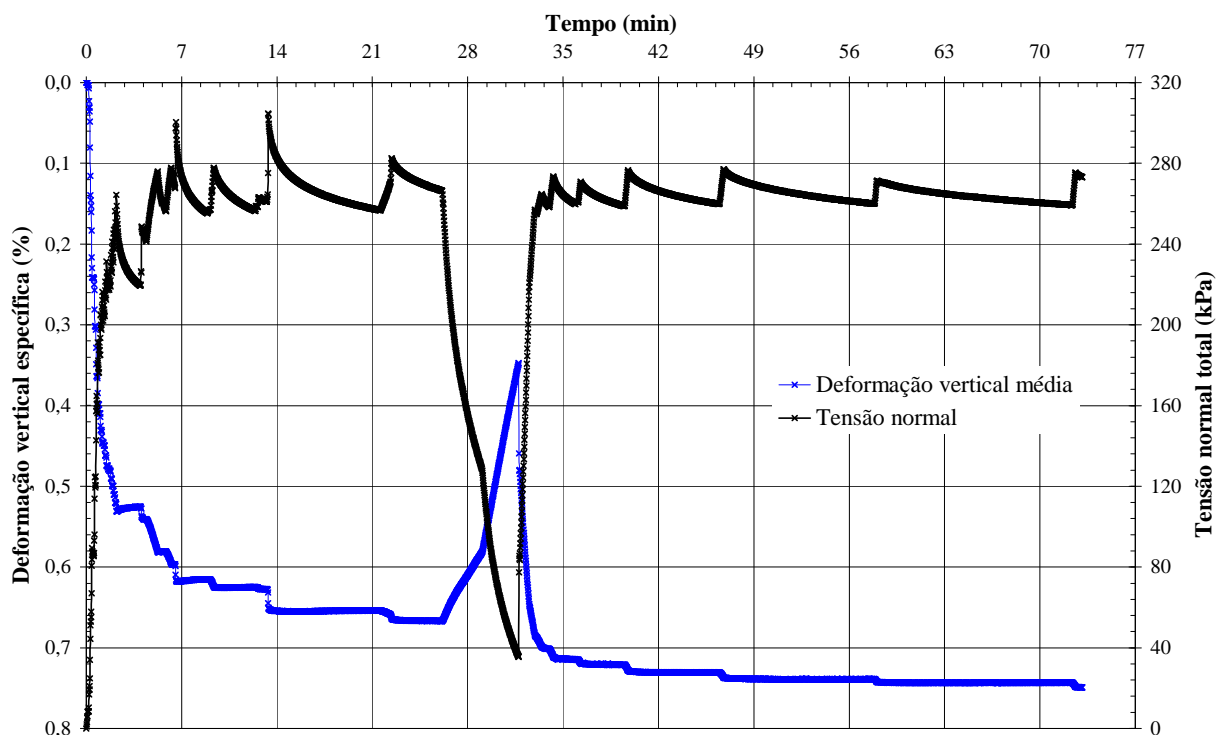


Figura 7.30 - Ensaio BB 270: tempo vs deformação vertical específica média vs tensão normal total

A Figura 7.31 corresponde ao estágio de cisalhamento.

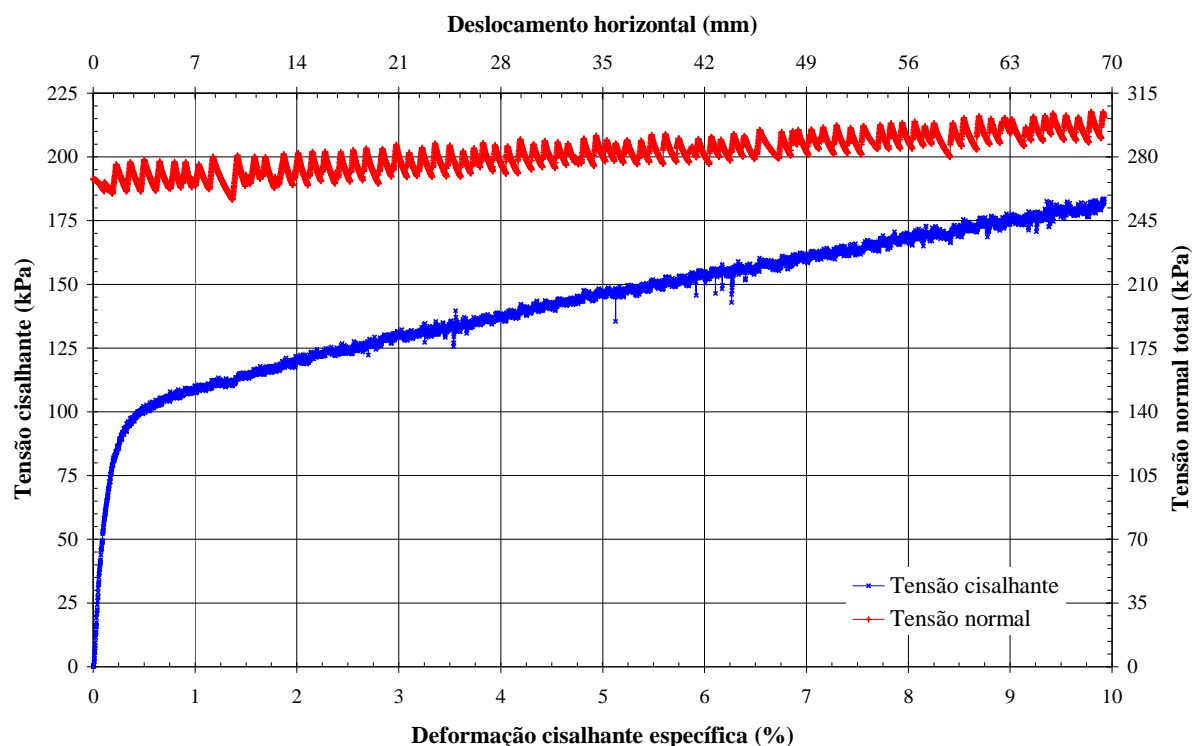


Figura 7.31 - Ensaio BB 270: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante vs tensão normal total

Nota-se na Figura 7.31:

- 1 – Rápido aumento inicial da tensão cisalhante até deformação de 0,40%. Ponto de inflexão da curva em aproximadamente 97kPa.
- 2 – Após deformação de 0,40% aumento lento, mas constante, da tensão cisalhante até 10,0%, com taxa de variação praticamente constante em relação à deformação. Este fato pode ter sido causado, em parte, pelo aumento da tensão normal.

Não foi possível atingir deformações cisalhantes maiores que 10%, neste e nos ensaios seguintes, devido à rotação do top-cap, superior à capacidade de rotação da rótula. Essa rotação, bem como as deformações verticais, é apresentada na Figura 7.32.

A Figura 7.33 apresenta as curvas de distribuição granulométrica antes e após o ensaio. A Tabela 7.14 indica os coeficientes de uniformidade e de curvatura e o grau de fraturamento.

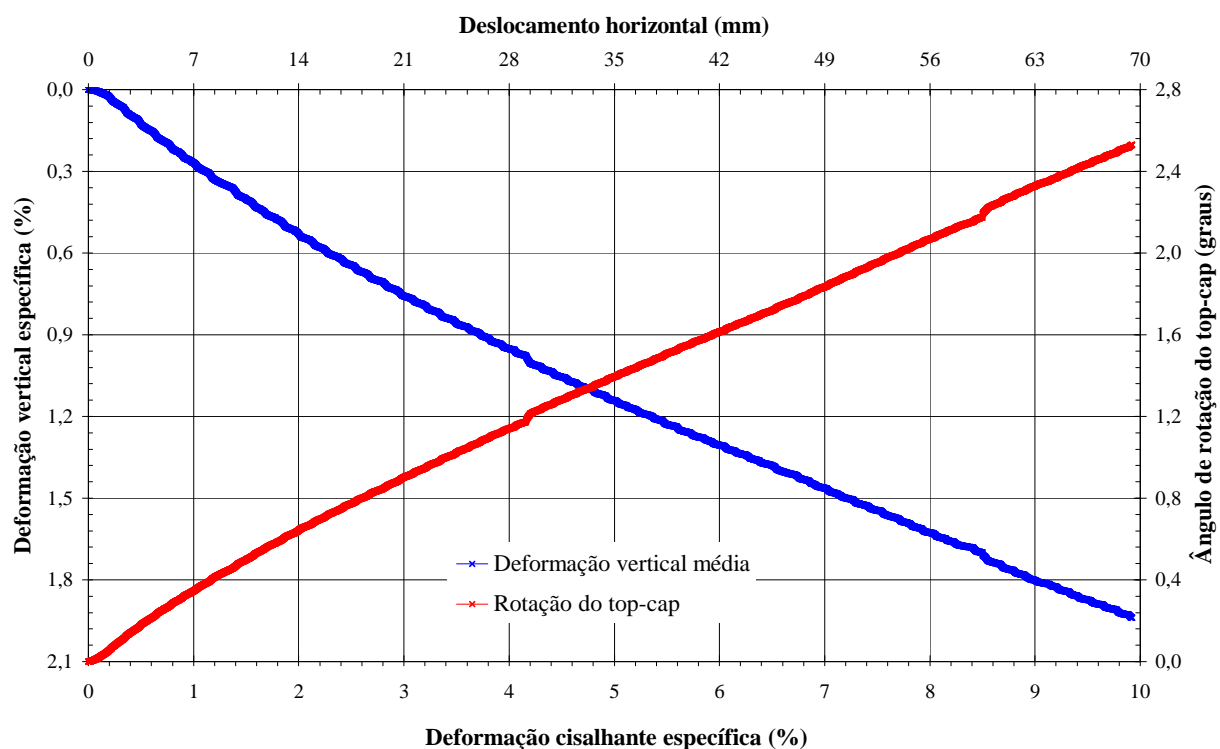


Figura 7.32 - Ensaio BB 270: deformação cisalhante específica vs deformação vertical específica média vs ângulo de rotação do *top-cap*

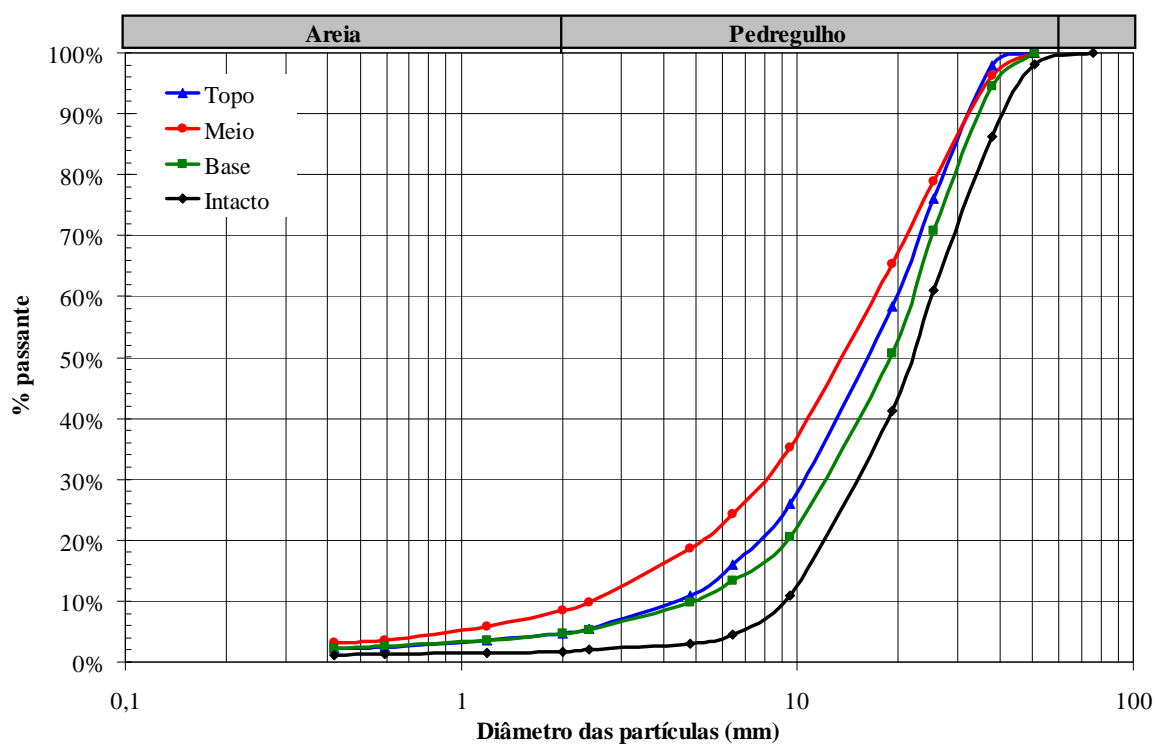


Figura 7.33 - Ensaio BB 270: curvas de distribuição granulométrica antes e depois do ensaio



Tabela 7.14 - Ensaio BB 270: coeficientes de uniformidade e curvatura e grau de fraturamento

Amostra	Cu	Cc	Bg (%)
Intacto	2,6	1,1	-
Topo	4,8	1,4	17,2
Meio	7,1	1,6	24,2
Base	4,2	1,4	10,0

#### 7.5.4. Ensaio BB 350

O estágio de consolidação deste ensaio ocorreu normalmente, porém durante o cisalhamento problemas hidráulicos com o atuador responsável pela aplicação do esforço cisalhante impediram que sua conclusão. Mesmo assim, optou-se por apresentar os resultados obtidos, mesmo que sejam parciais. A Figura 7.34 resume o estágio de consolidação. Nas Figuras 7.35 e 7.36 são apresentados os resultados do estágio de cisalhamento, obtidos até a ocorrência dos problemas citados. Como o ensaio não foi concluído, optou-se por não determinar as curvas granulométricas pós-ensaio.

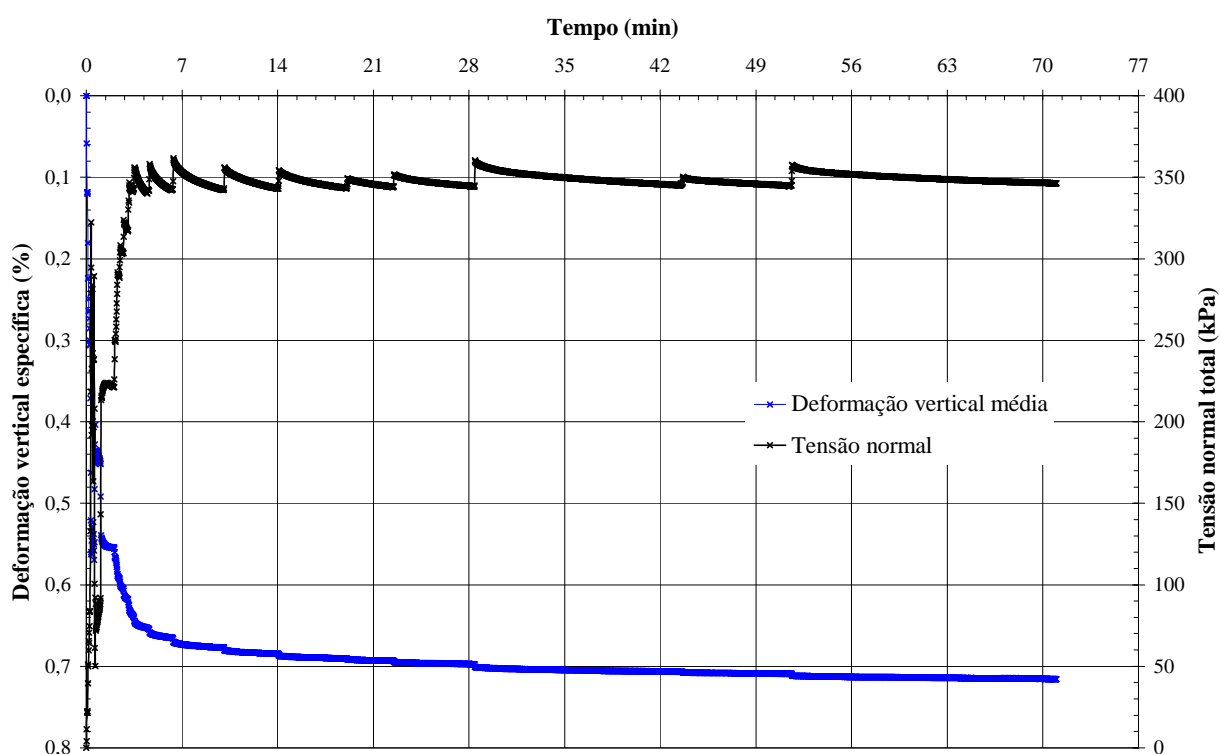


Figura 7.34 - Ensaio BB 350: tempo vs deformação vertical específica média vs tensão normal total

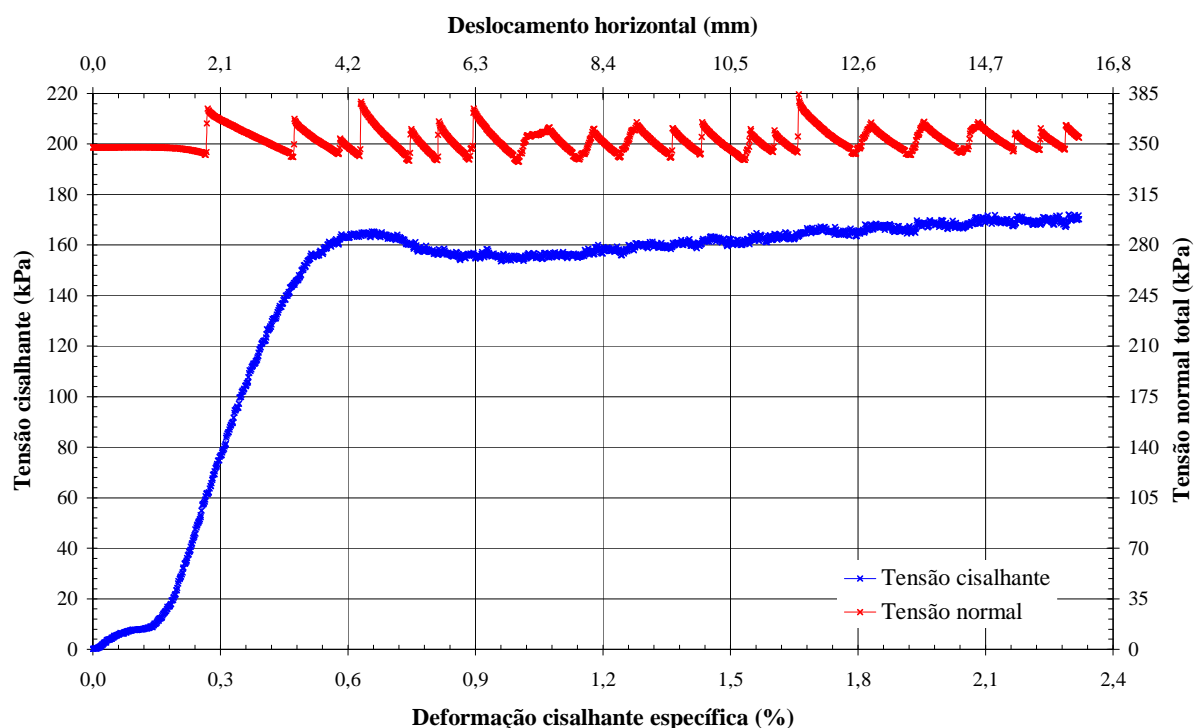


Figura 7.35 - Ensaio BB 350: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante vs tensão normal total

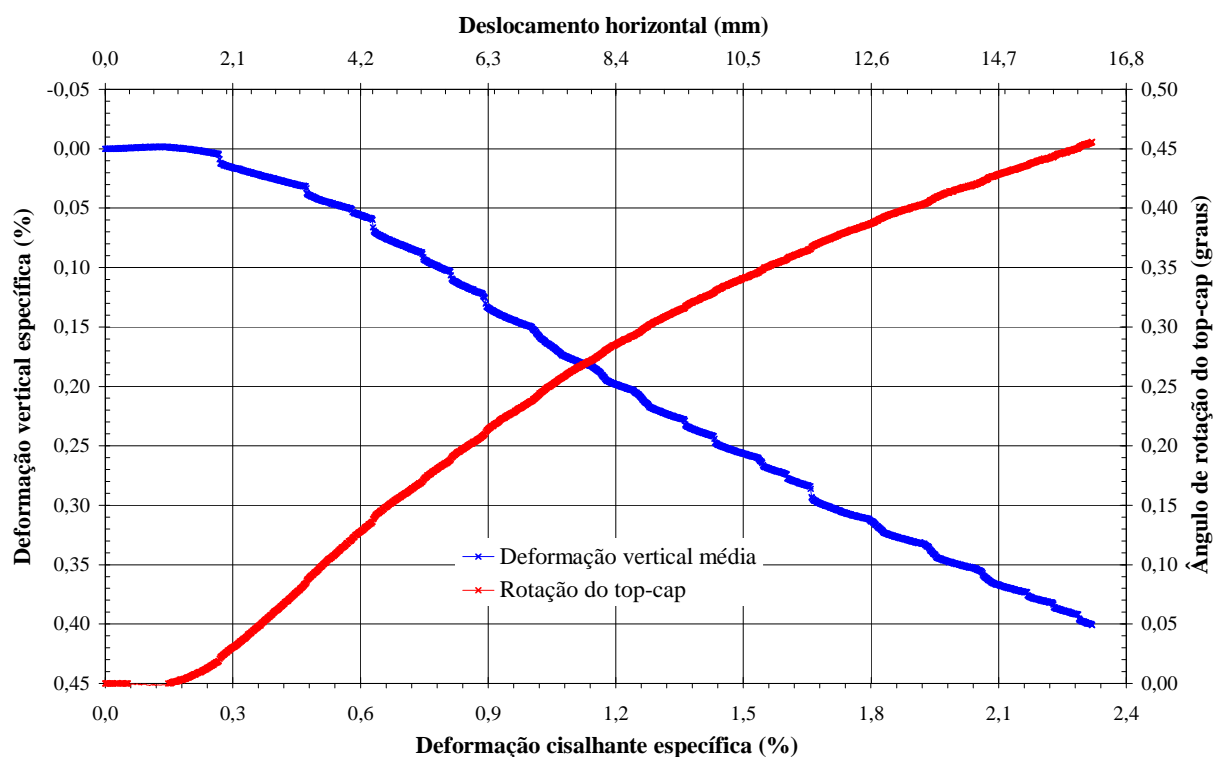


Figura 7.36 - Ensaio BB 350: deformação cisalhante específica vs deformação vertical específica média vs ângulo de rotação do *top-cap*

### 7.5.5. Ensaio BB 430

Neste ensaio foi necessário utilizar rejeitos Bonito para compor a primeira camada do corpo de prova (14, 6cm da base) devido a escassez de rejeitos Barro Branco. Como o plano de cisalhamento está cerca de 35cm acima do fundo da caixa, acredita-se que esse fato não tenha tido influência significativa na resistência deste corpo de prova.

A Figura 7.37 resume os resultados obtidos no estágio de consolidação.

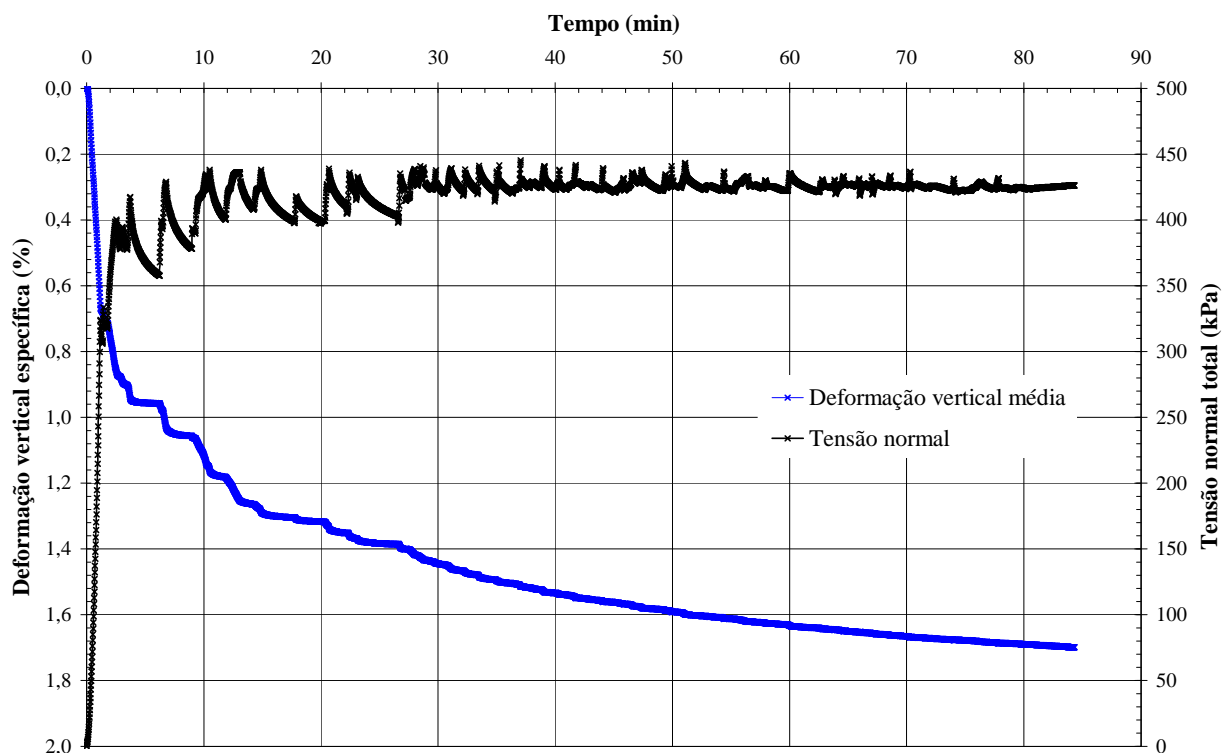


Figura 7.37 - Ensaio BB 430: tempo vs deformação vertical específica média vs tensão normal total

As Figuras 7.38 e 7.39 apresentam os resultados do estágio de cisalhamento. Da mesma forma que nos ensaios anteriores, nota-se na Figura 7.38 rápido aumento da tensão cisalhante no início do ensaio, um ponto de inflexão da curva e, após, aumento lento mas contínuo, com longo trecho praticamente linear. O ponto de inflexão ocorreu, aproximadamente, com deformação cisalhante de 0,38%, quando a tensão cisalhante era de 110kPa. A tensão normal total também aumentou lentamente.

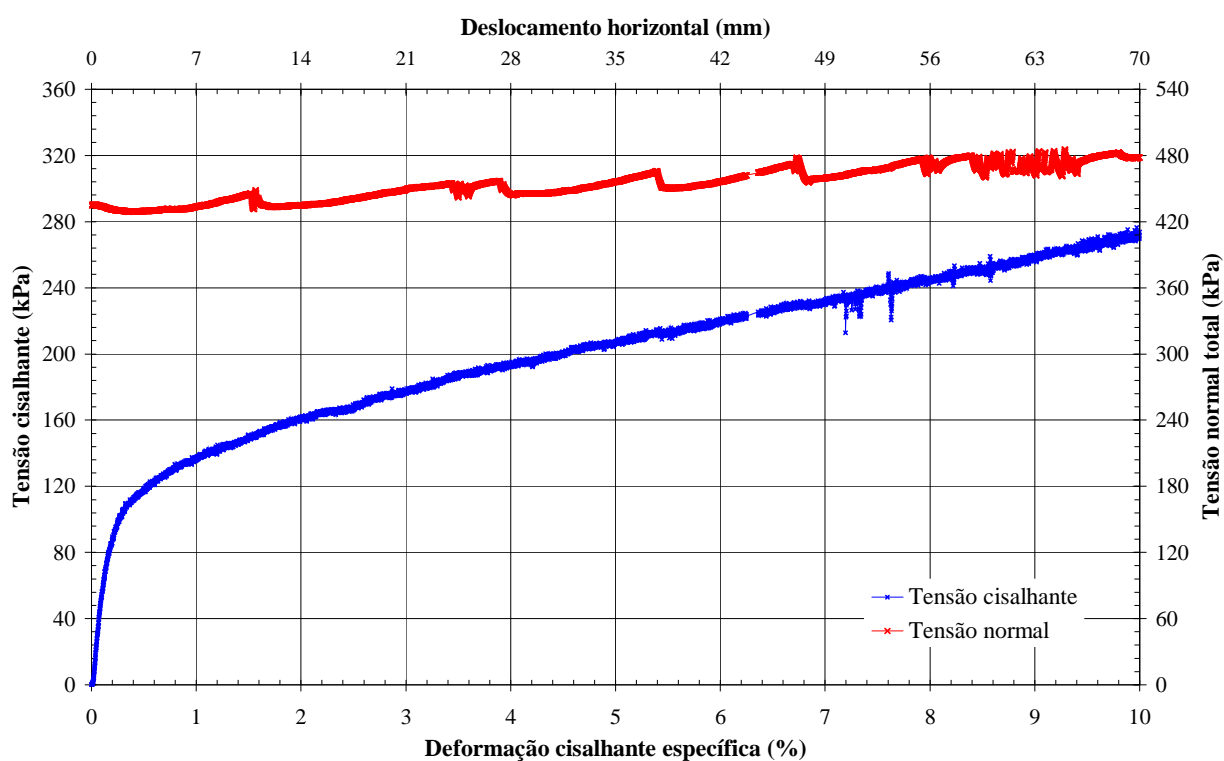


Figura 7.38 - Ensaio BB 430: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante vs tensão normal total

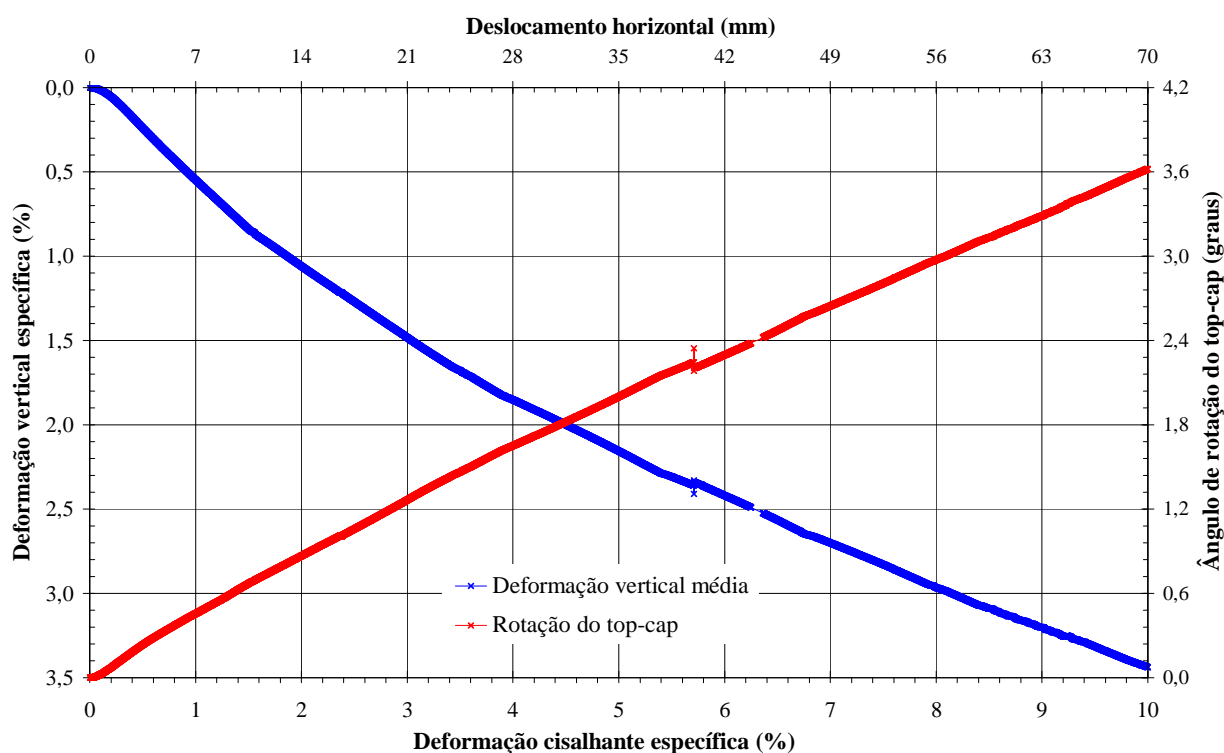


Figura 7.39 - Ensaio BB 430: deformação cisalhante específica vs deformação vertical específica média vs ângulo de rotação do *top-cap*

Neste ensaio não foi possível determinar a granulometria para a base do corpo de prova, devido aos problemas já citados. A Figura 7.40 e a Tabela 7.15 apresentam os resultados de granulometria obtidos.

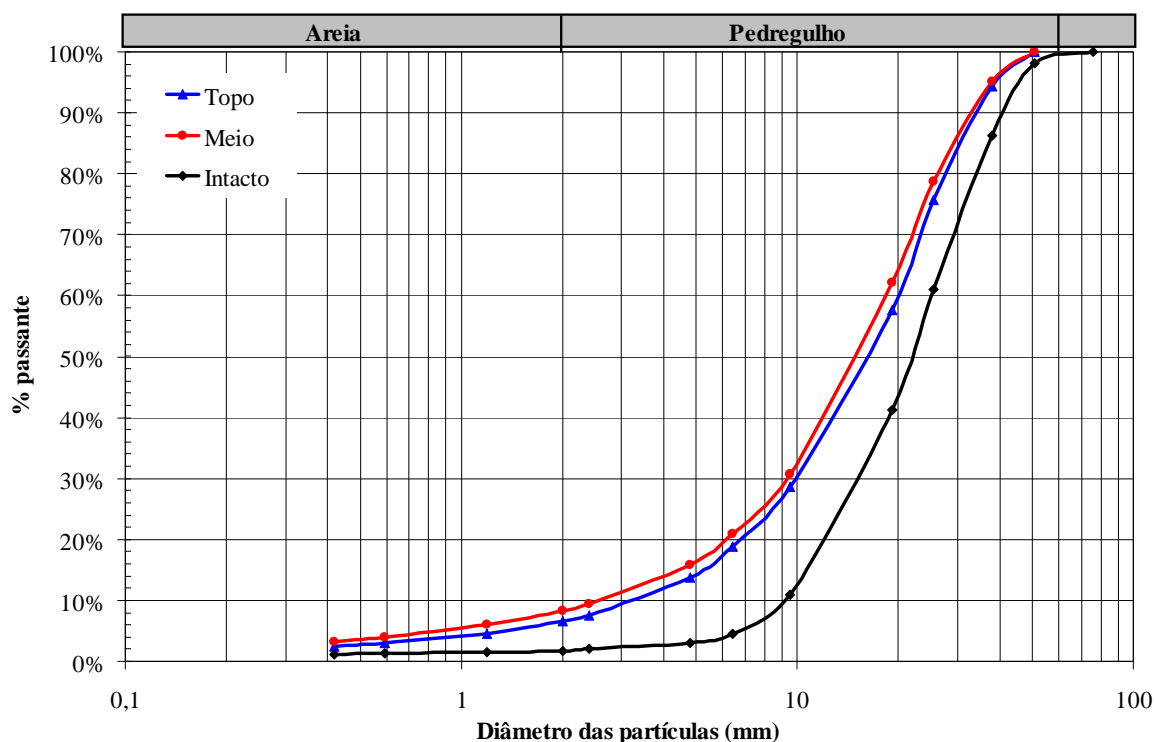


Figura 7.40 - Ensaio BB 430: curvas de distribuição granulométrica antes e depois do ensaio

Tabela 7.15 - Ensaio BB 430: coeficientes de uniformidade e curvatura e grau de fraturamento

Amostra	Cu	Cc	Bg (%)
Intacto	2,6	1,1	-
Topo	6,6	1,6	17,6
Meio	7,6	1,9	20,8

#### 7.5.6. Ensaio BB 600

Neste ensaio foram encontradas dificuldades com o sistema de controle do atuador hidráulico responsável pela aplicação do esforço cisalhante. Por este motivo, o estágio de consolidação teve de ser interrompido, após as deformações verticais já terem estabilizado. O corpo de prova teve de ser completamente descarregado. Cerca de cinco dias depois foi realizada nova consolidação, com mesma tensão normal antes utilizada, e o corpo de prova pode então ser cisalhado. A Figura 7.41 apresenta os dados da primeira consolidação. Neste caso não foi possível obter os dados do descarregamento. A Figura 7.42 se refere à segunda consolidação, logo após a qual ocorreu o cisalhamento.

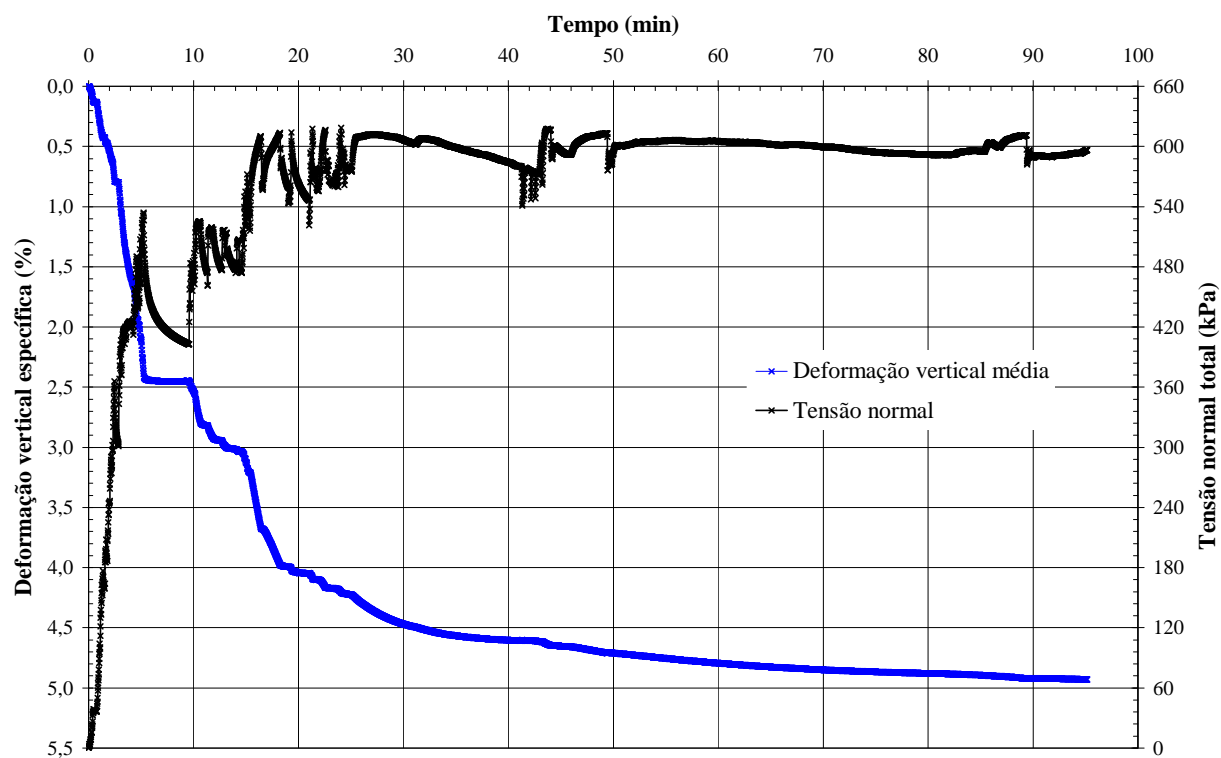


Figura 7.41 - Ensaio BB 600: tempo vs deformação vertical específica média vs tensão normal total, consolidação 1

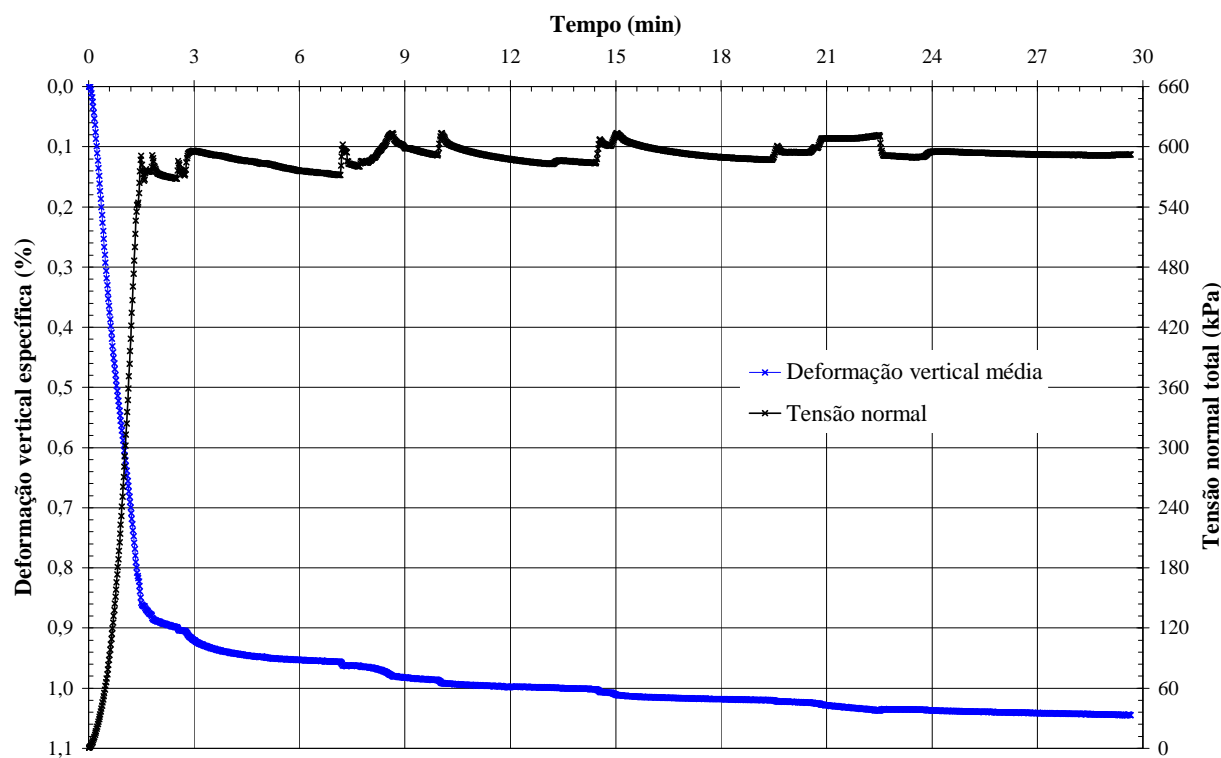


Figura 7.42 - Ensaio BB 600: tempo vs deformação vertical específica média vs tensão normal total, consolidação 2

As Figuras 7.43 e 7.44 correspondem ao estágio de cisalhamento.

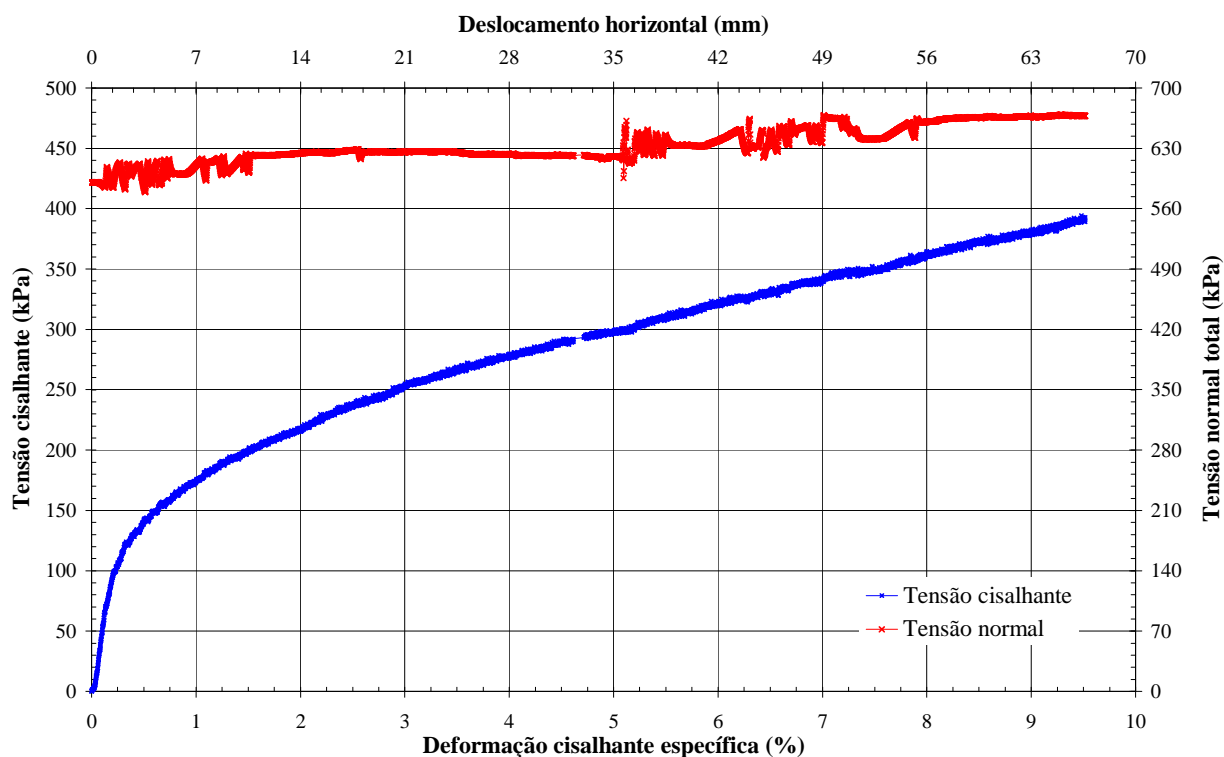


Figura 7.43 - Ensaio BB 600: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante vs tensão normal total

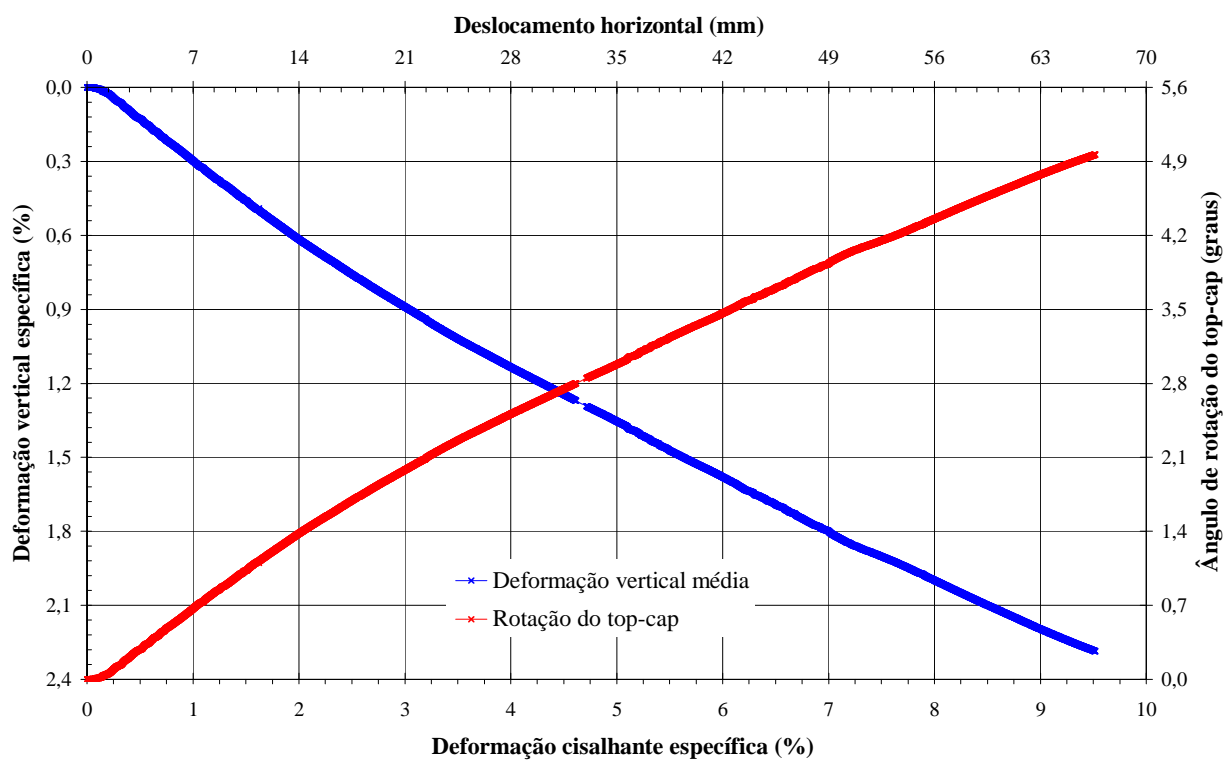


Figura 7.44 - Ensaio BB 600: deformação cisalhante específica vs deformação vertical específica média vs ângulo de rotação do *top-cap*

Neste ensaio o ponto de inflexão na curva da tensão cisalhante (Figura 7.43) é menos nítido que nos anteriores. Porém, o rápido aumento da tensão cisalhante no início e o trecho linear posterior persistem. Estima-se o ponto de inflexão na deformação de 0,4%, quando a tensão cisalhante era de 125kPa.

A Figura 7.45 apresenta as curvas de distribuição granulométricas e a Tabela 7.16 os coeficientes de uniformidade  $C_u$  e de curvatura  $C_c$  e o grau de fraturamento  $B_g$ .

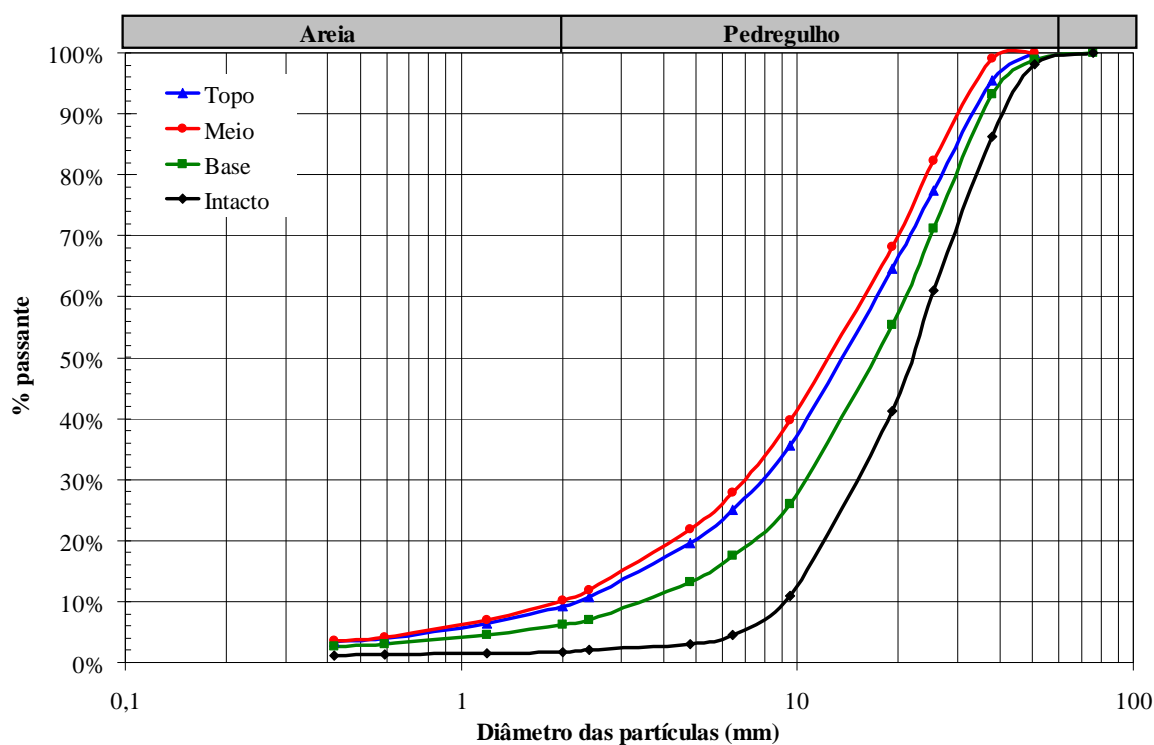


Figura 7.45 - Ensaio BB 600: curvas de distribuição granulométrica antes e depois do ensaio

Tabela 7.16 - Ensaio BB 600: coeficientes de uniformidade e curvatura e grau de fraturamento

Amostra	$C_u$	$C_c$	$B_g$ (%)
Intacto	2,6	1,1	-
Topo	7,7	0,7	24,6
Meio	7,5	0,6	28,7
Base	6,0	0,8	15,1



### 7.5.7. Análise comparativa

São comparadas a seguir as seguintes curvas para os cinco ensaios de grandes dimensões:

- 1 - deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante
- 2 - deformação cisalhante específica vs deformação vertical específica média
- 3 - deformação cisalhante específica vs ângulo de rotação do *top-cap*

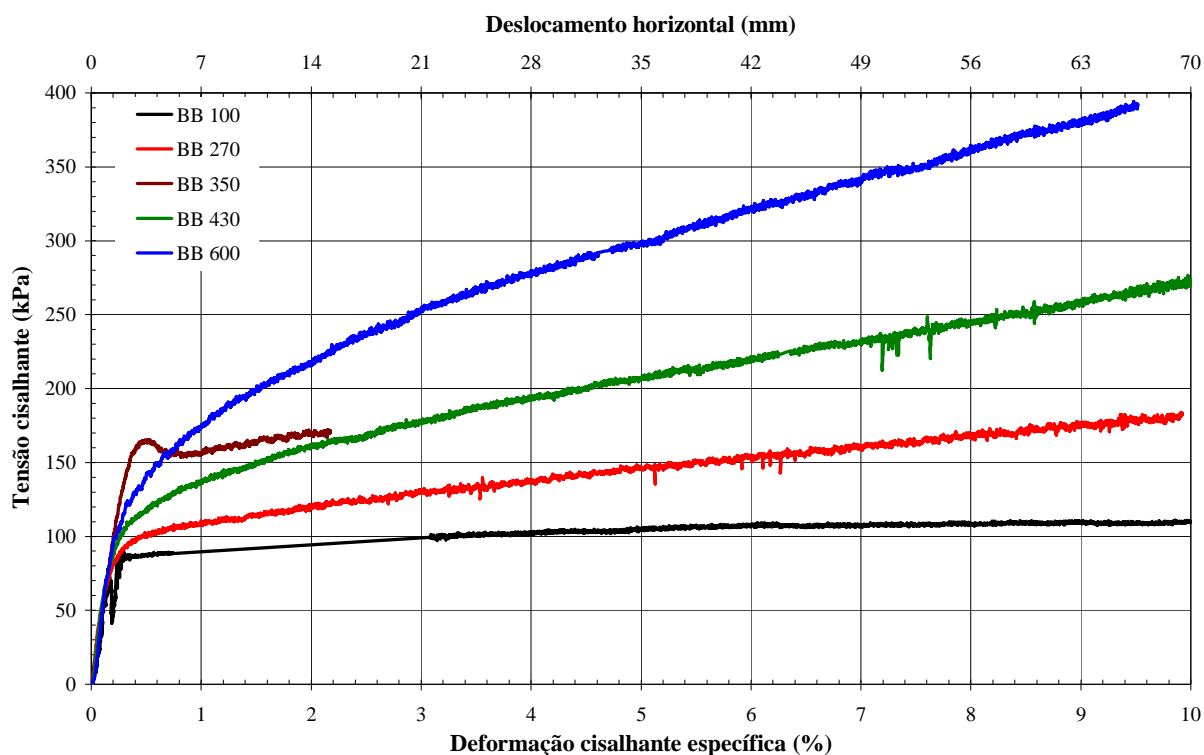


Figura 7.46 - Ensaios BB: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante - comparação

Na curva do ensaio BB 100, o trecho com grande oscilação da tensão cisalhante, entre 0,7 e 3,0%, foi ajustado para uma reta de tendência. Além disso, para facilitar a comparação, foi suprimido a parcela da curva com deformações cisalhantes específicas maiores que 10%. Também a curva do ensaio BB 350 sofreu ajustes em sua parte inicial.

Note-se que os ensaios BB 100, 270, 430 e 600 não apresentaram pico de tensão cisalhante, ao contrário do BB 350. Nos quatro primeiros, percebe-se que a medida que a tensão de confinamento aumenta o ponto de inflexão da curva torna-se menos nítido. A tensão cisalhante correspondente a este ponto de inflexão aumenta com a tensão confinante, partindo de 89 kPa, para o BB 100, e atingindo cerca de 125kPa, para o BB 600. Acredita-se que a quebra de partículas tenha papel determinante nessa relação.

Verifica-se na Figura 7.47, detalhe da anterior, que as inclinações dos trechos iniciais das cinco curvas são muito semelhantes. Nos ensaios BB 100, 270, 430 e 600, após o ponto de inflexão citado, ocorreu lento aumento da tensão cisalhante. Nesse trecho, a variação da tensão cisalhante com as deformações cisalhantes foi praticamente linear. Somente no ensaio BB 100 as tensões cisalhantes chegaram a estabilizar. Além disso, nota-se que a inclinação do referido trecho aumenta com aumento da tensão de consolidação.

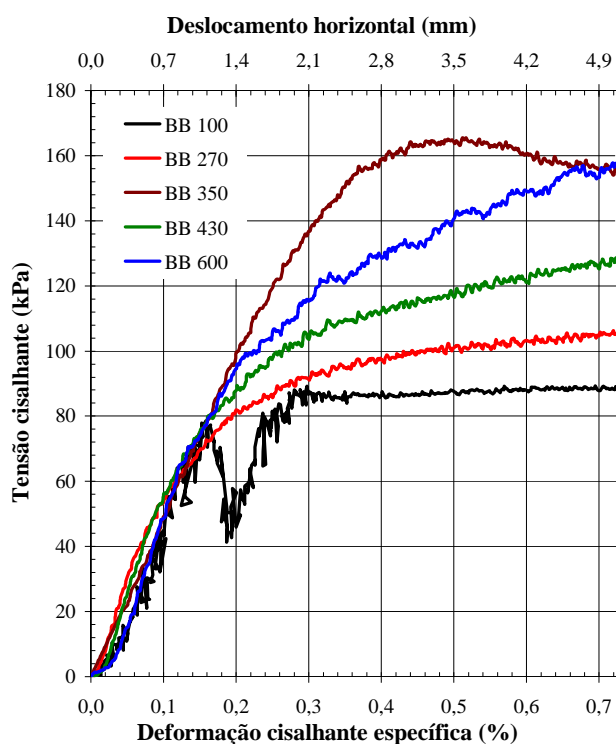


Figura 7.47 - Ensaios BB: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante vs tensão normal total - detalhe

Como em três dos cinco ensaios, BB 270, 430 e 600, não ocorreu nem estabilização da tensão cisalhante, nem pico, optou-se por utilizar critérios de deformação para definir a envoltória de ruptura (ver item 7.5.8)

As curvas de variação da deformação vertical específica com a deformação cisalhante específica, para os cinco ensaios, são apresentadas na Figura 7.48. Somente no ensaio BB 100 o corpo de prova teve aumento de volume durante o cisalhamento, com máximo de 0,07%. Nos outros quatro ensaios ocorreu somente diminuição de volume. Nota-se que no ensaio BB 600 a redução de volume foi menor que no BB 430. A provável causa disso foi a necessidade de duas consolidações, decorrente dos problemas relatados no item 7.5.6.

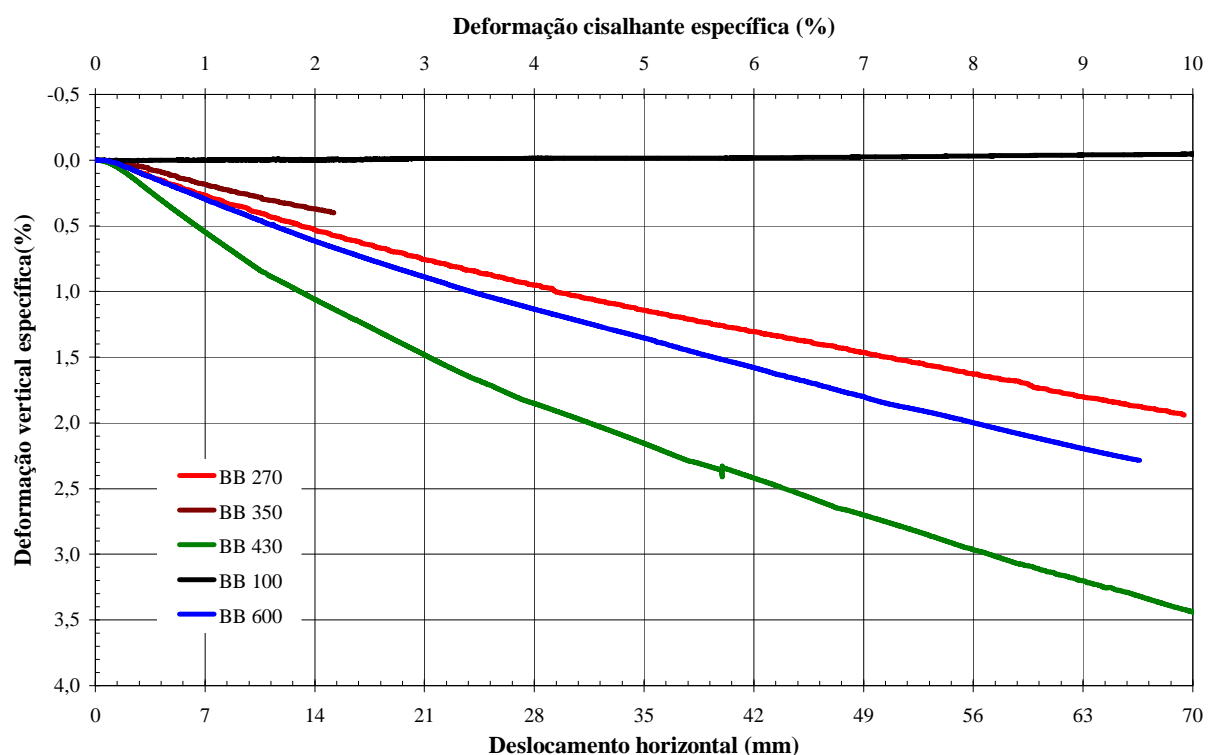


Figura 7.48 - Ensaios BB: deformação cisalhante específica vs deformação vertical específica  
média

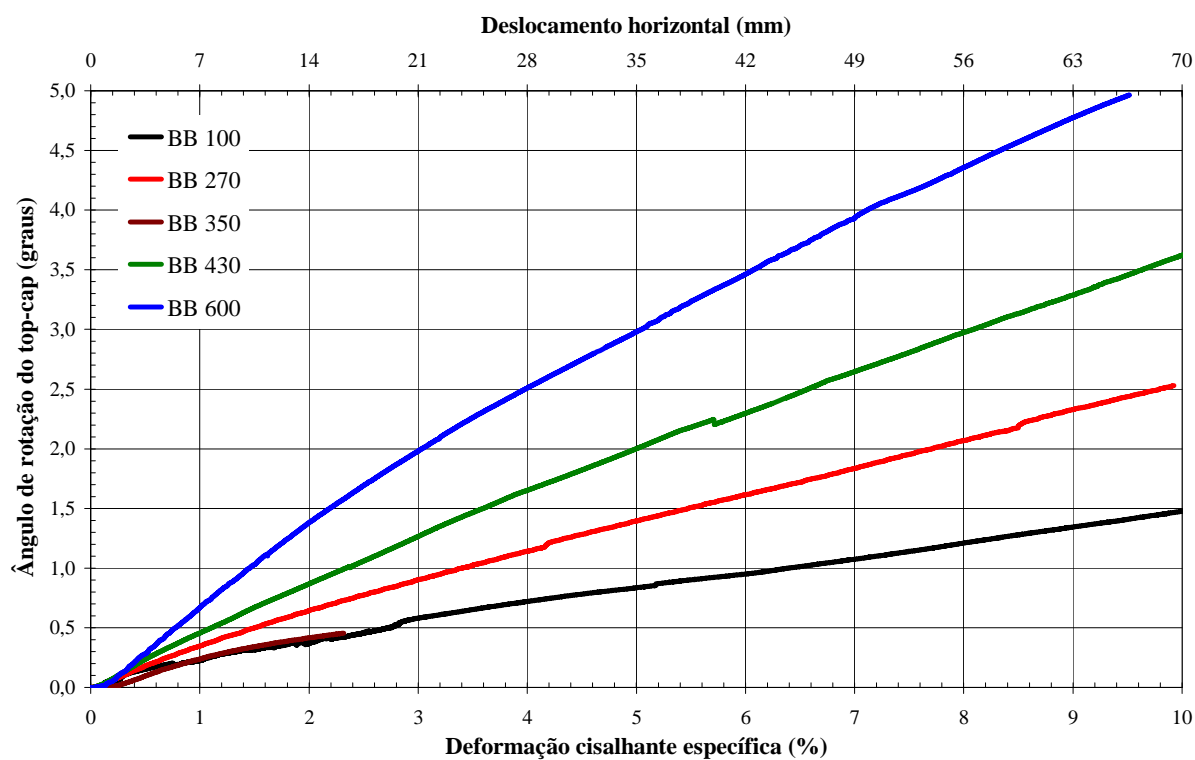


Figura 7.49 - Ensaios BB: deformação cisalhante específica vs ângulo de rotação do *top-cap*

Na Figura 7.49 verifica-se que, em geral, para mesma deformação cisalhante específica, o ângulo de rotação do *top-cap* aumenta com o aumento de tensão normal de confinamento. Somente o ensaio BB 350 não seguiu esta tendência, apresentando rotações semelhantes às do ensaio BB 100. Percebe-se também que, muito embora as deformações verticais do ensaio BB 600 tenham sido menores que às do BB 430, os ângulos de rotação foram maiores.

### 7.5.8. Envoltória de ruptura

Como já citado, para definição da envoltória de ruptura foram utilizados critérios de deformação cisalhante. Como o ensaio BB 350 não atingiu deformações cisalhantes elevadas, em comparação com os demais, devido a problemas anteriormente mencionados, optou-se por não considerá-lo na determinação da envoltória.

Foram determinadas envoltórias de ruptura para deformações cisalhantes específicas de 4,5 , 7,0 e 9,5%. Utilizou-se a equação proposta por de Mello (1977) para interpolação dos resultados experimentais. A Figura 7.50 apresenta os resultados obtidos, juntamente com os parâmetros  $a$  e  $b$  da equação de de Mello (1977). Os valores entre parênteses da legenda correspondem aos deslocamentos horizontais.

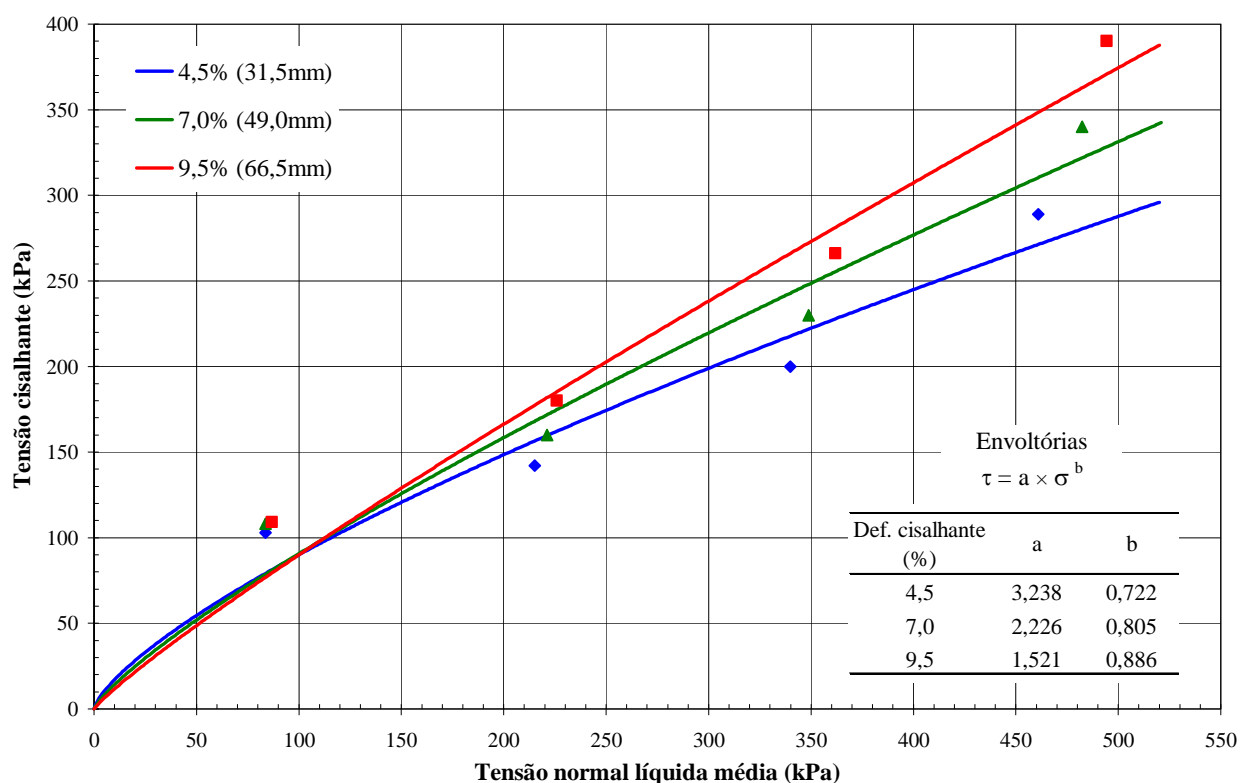


Figura 7.50 - Ensaios BB: envoltórias de ruptura para diferentes deformações cisalhantes

Verifica-se na Figura 7.50 que, para as três deformações cisalhantes utilizadas, os pontos correspondentes ao ensaio BB 100 se situam acima das linhas de tendência propostas. A bibliografia indica inclinações maiores para o trecho inicial da envoltória e menores para o trecho final (ver Indraratna, 1993, entre outros). A Figura 7.51 apresenta as variações do ângulo de atrito interno efetivo  $\phi$  e do intercepto coesivo  $c$  em função da tensão normal líquida média (descontando-se as forças de atrito estimadas, ver item 6.4.2.2), para as três envoltórias da Figura 7.50.

Ainda na Figura 7.50, nota-se que os pontos correspondentes ao ensaio BB 600 ficaram acima da tendência dos dois anteriores (BB 270 e BB 430). A causa deste fato pode ter sido os problemas ocorridos durante a execução do ensaio, relatados no item 7.5.6, que obrigaram a consolidar o corpo de prova duas vezes. Isso teria causando maior diminuição do índice de vazios e, conseqüentemente, conferindo maior resistência ao meio granular.

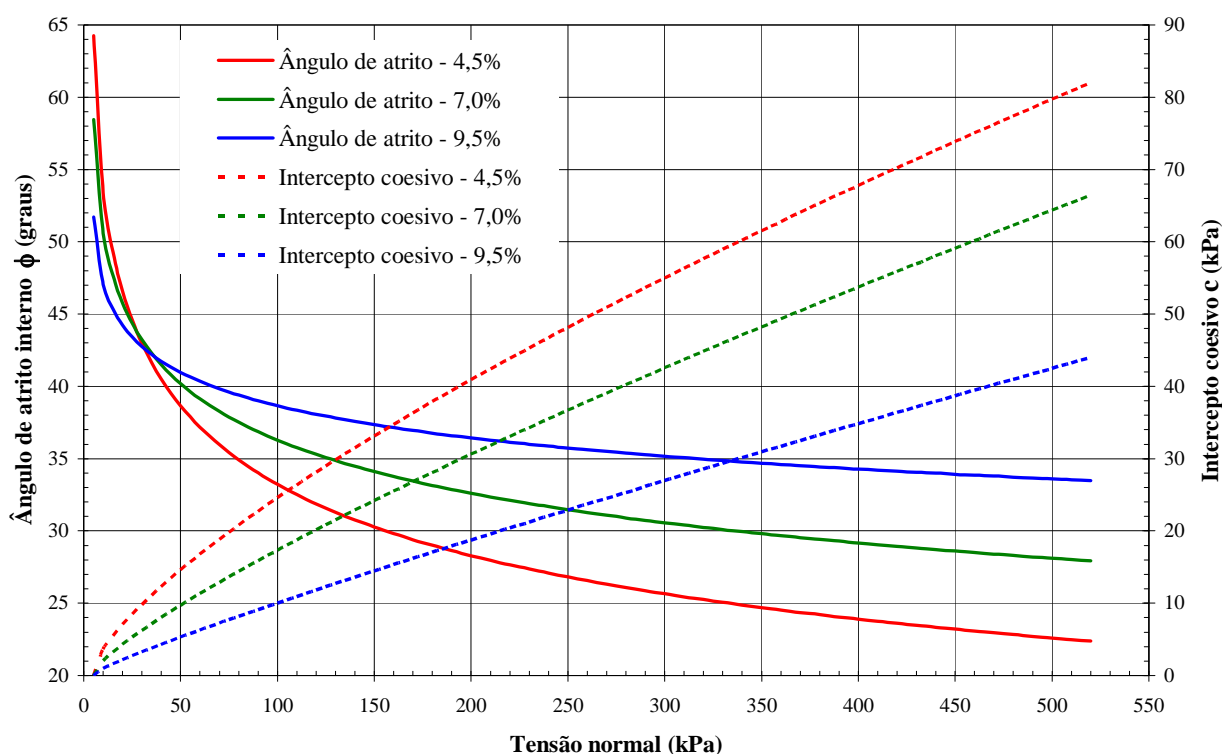


Figura 7.51 - Ensaios BB: variação de  $c$  e  $\phi$  com a tensão normal

### 7.5.9. Quebra de partículas

Nas Figuras 7.52 a 7.54 são comparadas as curvas granulométricas das amostras de topo, meio e base dos ensaios BB 100, BB 270, BB 430 e BB 600.

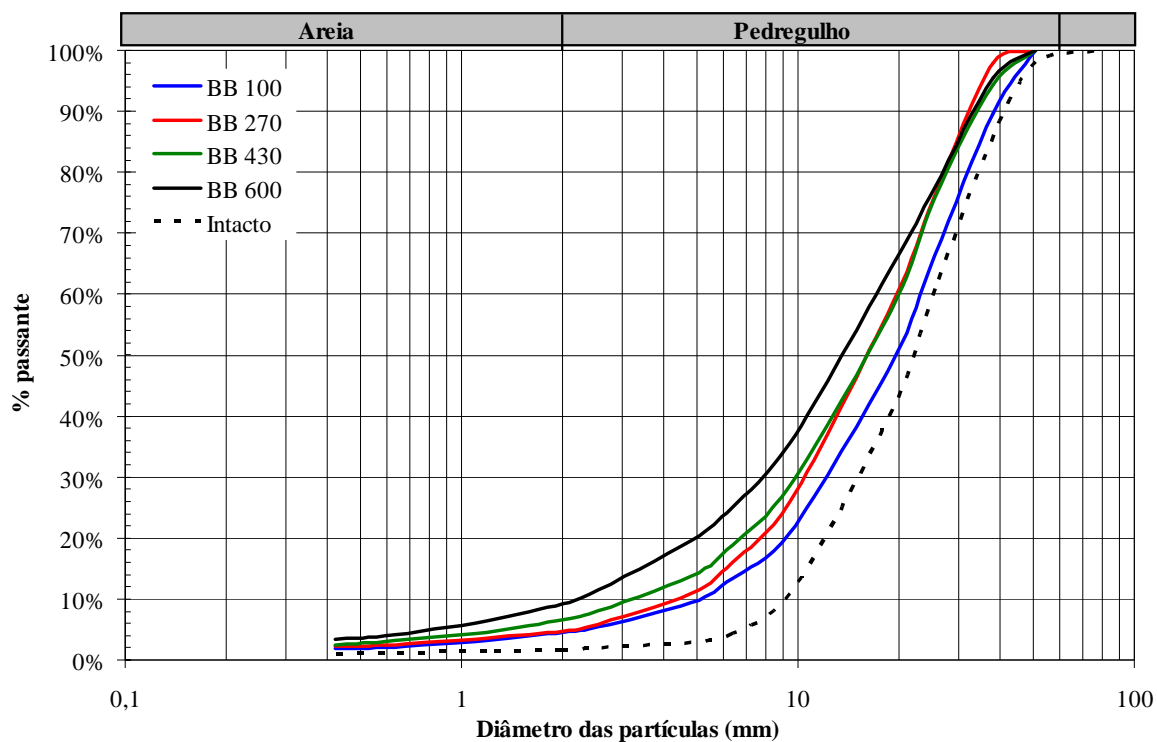


Figura 7.52 - Ensaios BB, amostras do Topo: curvas de distribuição granulométrica antes e depois dos ensaios

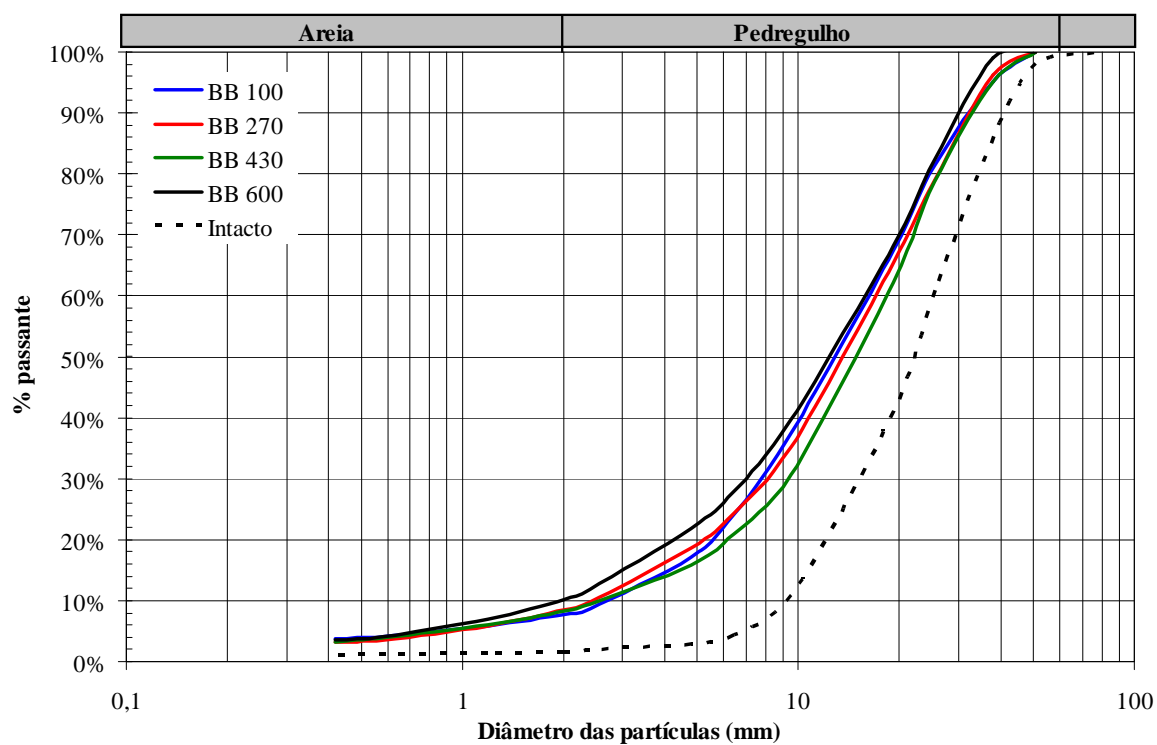


Figura 7.53 - Ensaios BB, amostras do Meio: curvas de distribuição granulométrica antes e depois dos ensaios

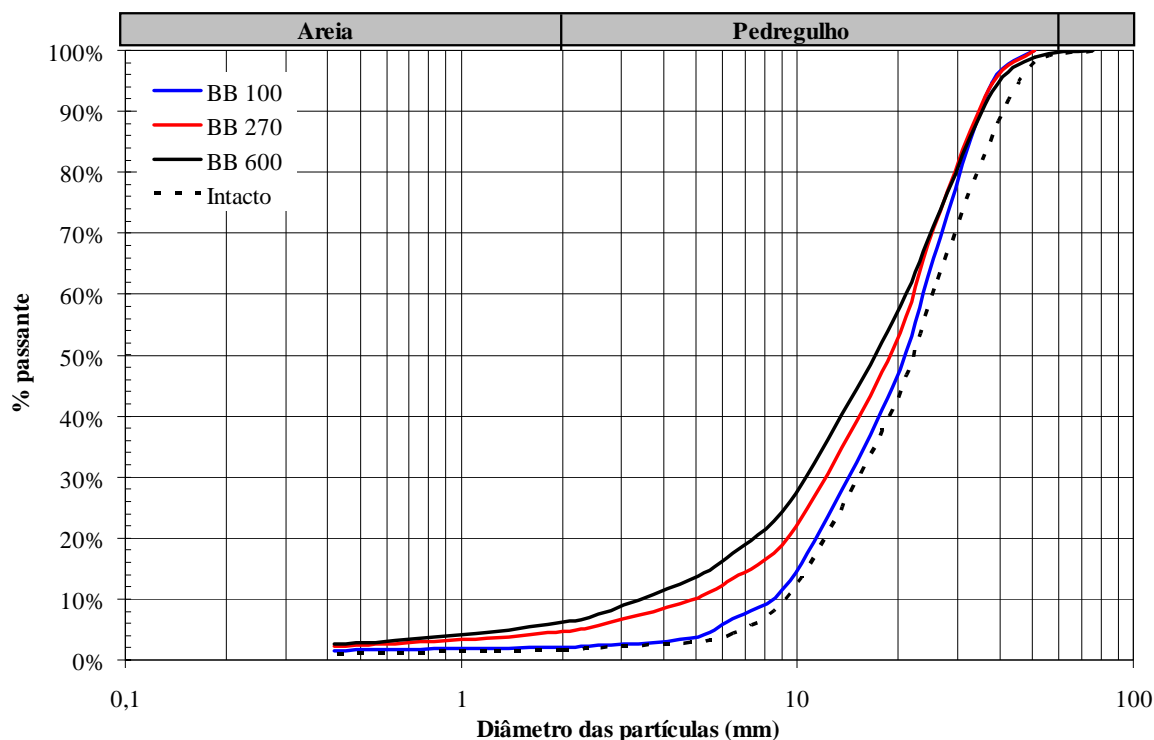


Figura 7.54 - Ensaios BB, amostras da Base: curvas de distribuição granulométrica antes e depois dos ensaios

Na parte central dos corpos de prova (meio), isto é, no plano de cisalhamento, a quebra de partículas foi mais acentuada, o que já era esperado. As diferenças entre os graus de fraturamento Bg foram menores nessas amostras do que nas de topo e base, conforme indica a Tabela 7.17. Para todos os ensaios o grau de fraturamento foi maior no topo do que na base. A Figura 7.55 apresenta a variação grau de fraturamento Bg com tensão normal total média para topo, meio e base.

Tabela 7.17 - Grau de fraturamento Bg

Amostra	Ensaio			
	BB 100	BB 270	BB 430	BB 600
Topo	9,9	17,2	17,6	24,6
Meio	26,5	24,2	20,8	28,7
Base	9,3	10,0	-	15,1

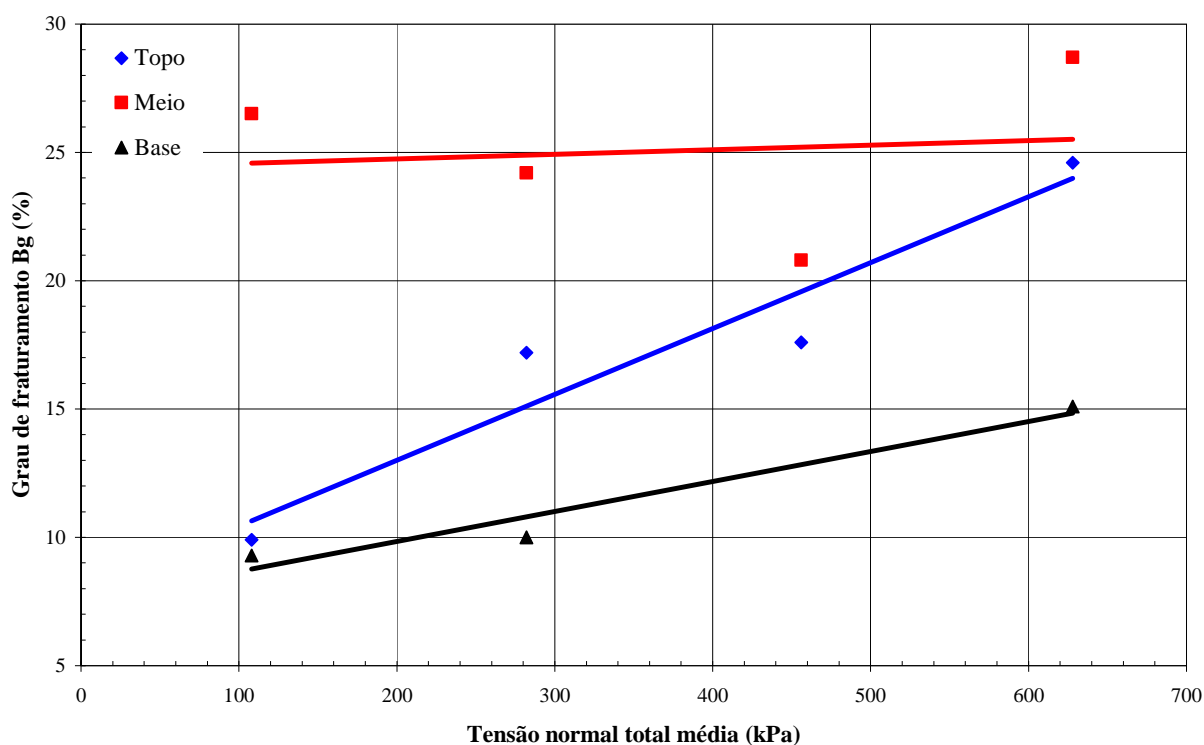


Figura 7.55 - Ensaio BB: tensão normal total média vs grau de fraturamento Bg

As curvas de topo e base apresentam tendência bem definida, muito embora a de base possua três pontos e na de topo a dispersão dos resultados seja significativa. Já a curva correspondente ao meio não apresenta tendência bem definida. Nota-se, todavia, que o surgimento de tensões de cisalhamento aumenta significativamente a quebra das partículas.

A Tabela 7.18 apresenta os coeficientes de uniformidade Cu antes e após os ensaios.

Tabela 7.18 - Coeficientes de uniformidade

Amostra	Intacta	Ensaio			
		BB 100	BB 270	BB 430	BB 600
Topo	2,6	4,3	4,8	6,6	7,7
Meio	2,6	6,4	7,1	7,6	7,5
Base	2,6	2,6	4,2	-	6,0

São identificadas duas tendências claras: a) quanto maior a tensão de confinamento mais bem graduado o material se torna após os ensaios e b) no plano de cisalhamento o material se torna mais bem graduado do que no topo, que por sua vez se torna mais bem graduado que na base. A Figura 7.56 correlaciona tensão normal total média e Cu para topo, meio e base.



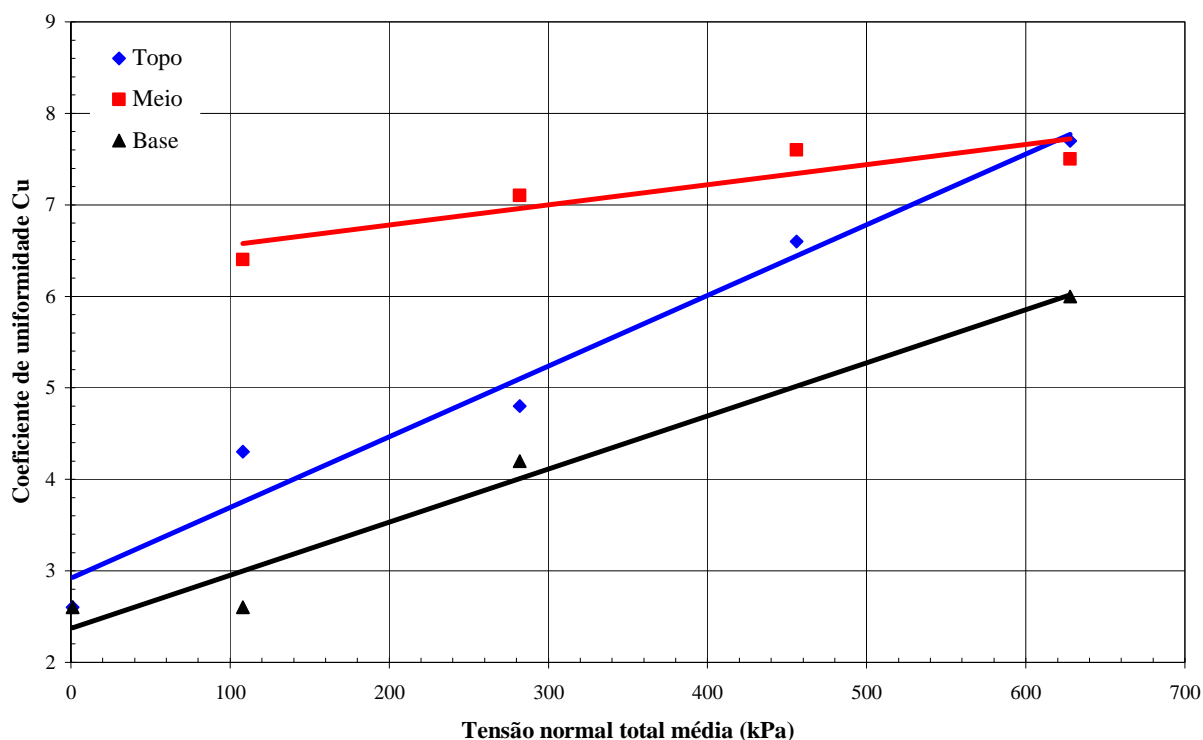


Figura 7.56 - Ensaios BB: tensão normal total média vs coeficiente de uniformidade Cu

Embora alguns pontos possuam significativa dispersão em relação à reta de interpolação, a tendência é clara nos três casos.

#### 7.5.10. Ensaios com modelação física

Além dos ensaios de grandes dimensões, foram realizados para esta pesquisa ensaios de cisalhamento direto com equipamentos de dimensões convencionais, para rejeito Barro Branco. Os corpos de prova possuíam dimensões de  $101 \times 101 \times 37$  mm. Devido à impossibilidade de se utilizar a granulometria de campo, realizou-se modelação desta. Para isso, dividiu-se o rejeito em frações granulométricas e compôs-se uma nova granulometria, paralela à de campo. Admitiu-se partículas com até 7,9mm de diâmetro. A relação entre a menor dimensão do corpo de prova (no caso a altura) e o máximo diâmetro de partícula ficou em 4,7. Na bibliografia encontram-se valores tão baixos quanto 4,2, como em Maia (2001). Marachi (1969) sugeriu valores maiores ou iguais a 6,0.

Nos quatro ensaios realizados foram empregadas tensões normais semelhantes às tensões normais líquidas médias dos ensaios BB 100, BB 270, BB 430 e BB 600 de grandes dimensões, isto é, as atuantes nos centros dos corpos de prova, já descontadas as forças de atrito estimadas. As Figuras 7.57 e 7.58 apresentam as curvas deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante e deformação cisalhante específica vs deformação vertical, respectivamente.

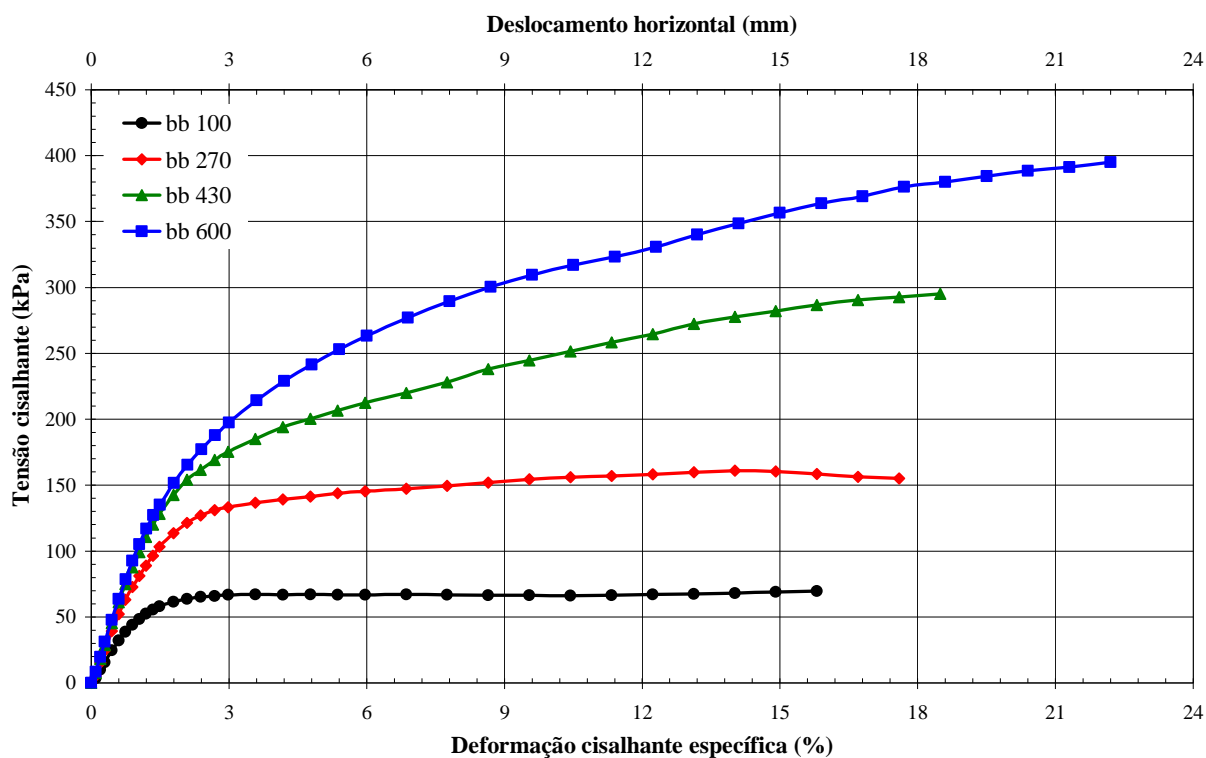


Figura 7.57 - Ensaios bb: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante

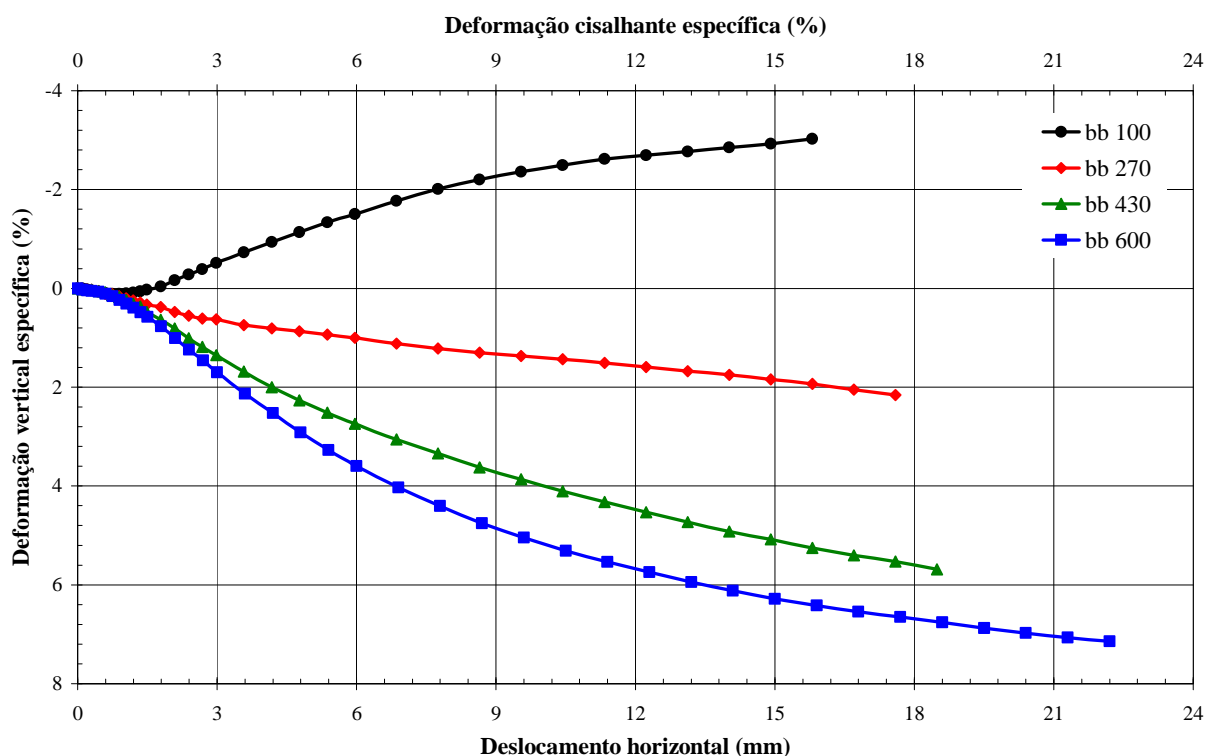


Figura 7.58 - Ensaios bb: deformação cisalhante específica vs deformação vertical específica

Na Figura 7.59, detalhe da Figura 7.57, nota-se significativa variação na inclinação dos trechos iniciais das curvas, diferentemente do verificado nos ensaios de grandes dimensões.

Além disso, os pontos de inflexão não são muito nítidos. Todavia, as curvas dos ensaios bb 430 e bb 600 praticamente coincidem até tensões cisalhantes da ordem de 150kPa, muito embora a partir deste valor as inclinações se tornem distintas. Com os ensaios BB 430 e BB 600 (grandes) ocorreu fenômeno semelhante, porém com tensões cisalhantes da ordem de 110kPa.

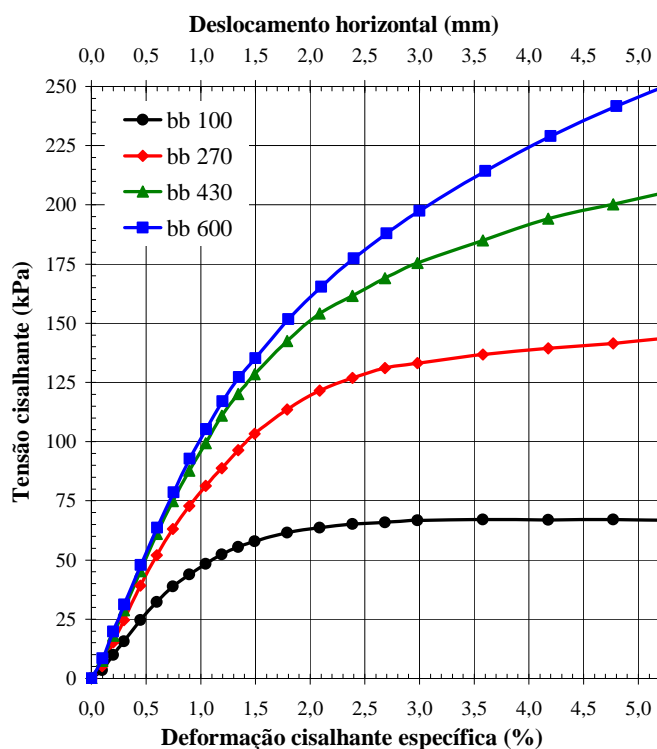


Figura 7.59 - Ensaios bb: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante - detalhe

À semelhança dos ensaios de grandes dimensões, somente no bb 100 ocorreu aumento de volume durante o cisalhamento. Porém, enquanto naquele caso a máxima deformação vertical específica foi de -0,7%, nos ensaios pequenos ela atingiu -3,0%.

A Figura 7.60 apresenta a envoltória de ruptura obtida, de tendência linear, com  $\phi$  de 35,4°. Não se percebe tendência curva na mesma.

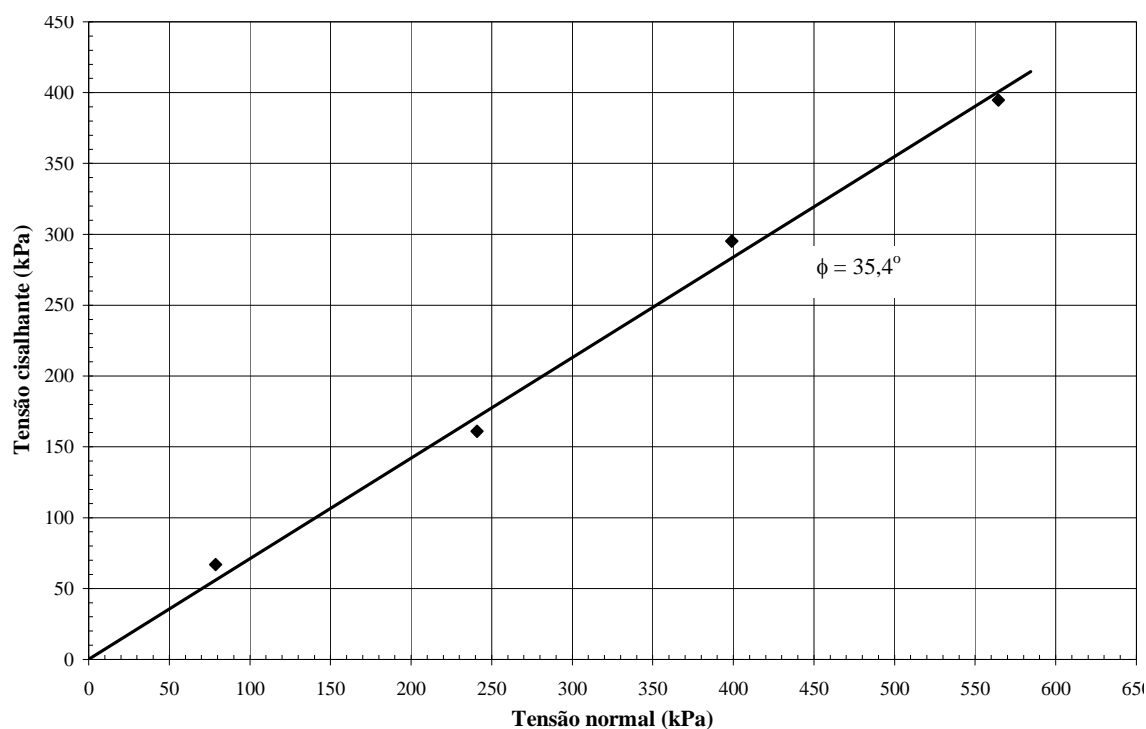


Figura 7.60 - Ensaios bb: envoltória de ruptura

#### 7.5.11. Comparação entre ensaios de grandes e pequenas dimensões

São apresentadas nas Figuras 7.61 e 7.62 as curvas deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante e deformação cisalhante específica vs deformação vertical específica, para ensaios de grandes e pequenas dimensões. Já nas Figuras 7.63 e 7.64 os dados são plotados não em função da deformação cisalhante específica, mas do deslocamento horizontal. Os inícios das curvas de tensão cisalhante se ajustam melhor quando esta é plotada em função do deslocamento horizontal.

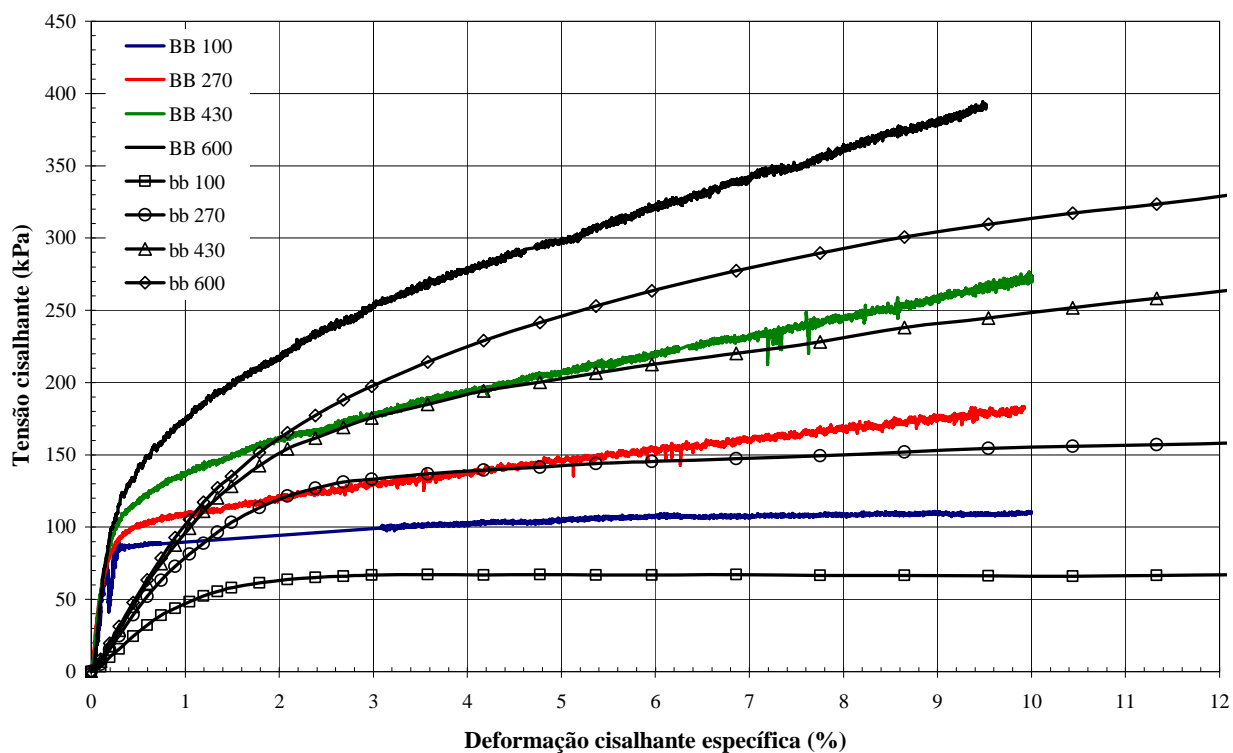


Figura 7.61 - Ensaios BB e bb: deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante

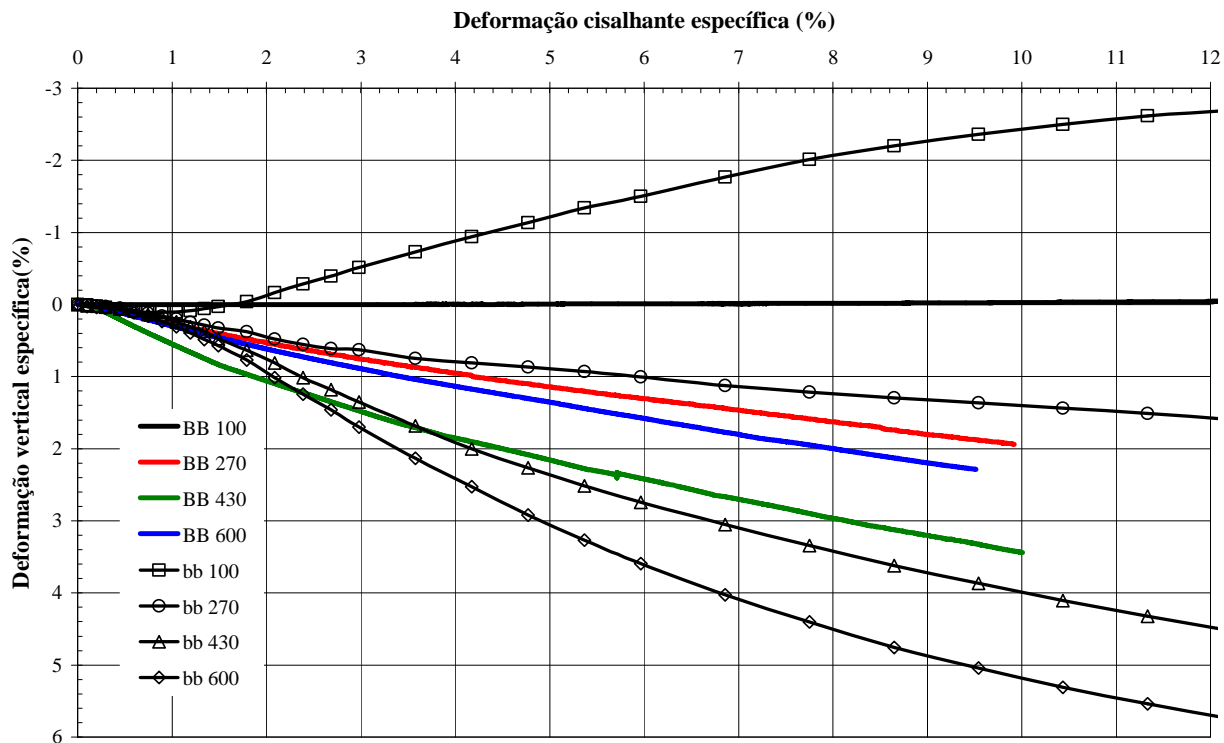


Figura 7.62 - Ensaios BB e bb: deformação cisalhante específica vs deformação vertical

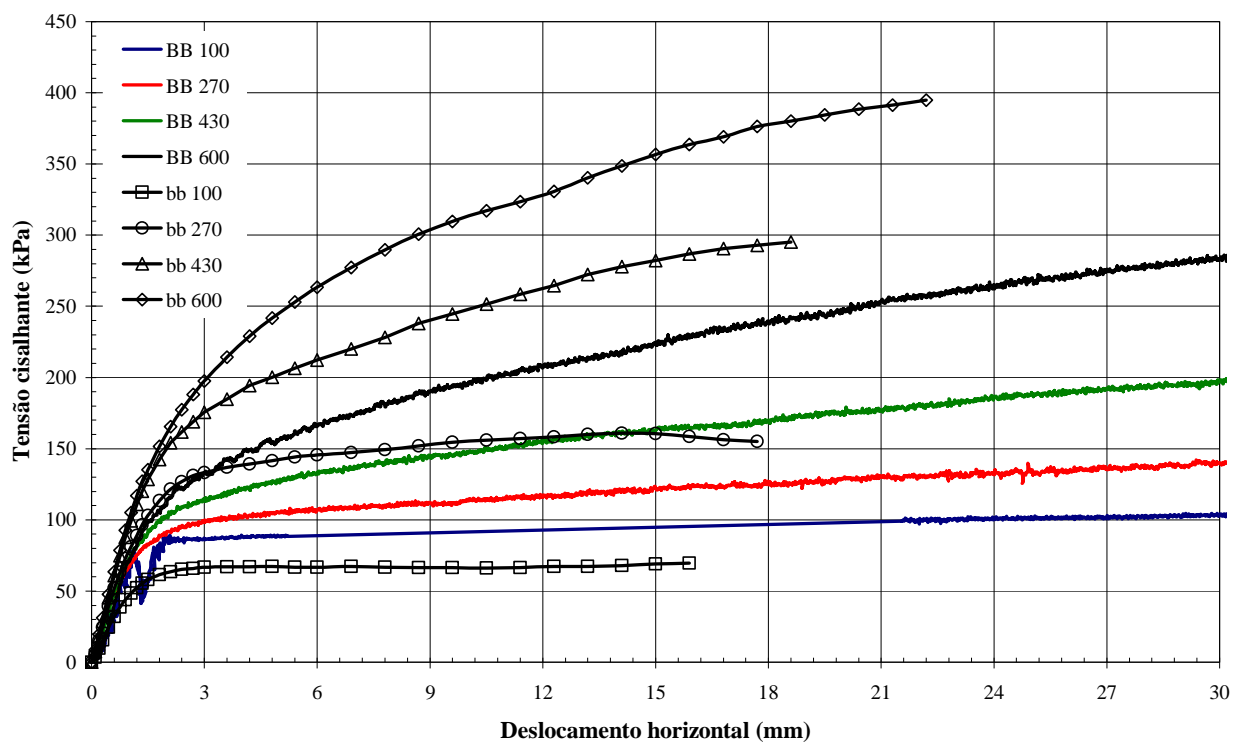


Figura 7.63 - Ensaios BB e bb: deslocamento horizontal vs tensão cisalhante

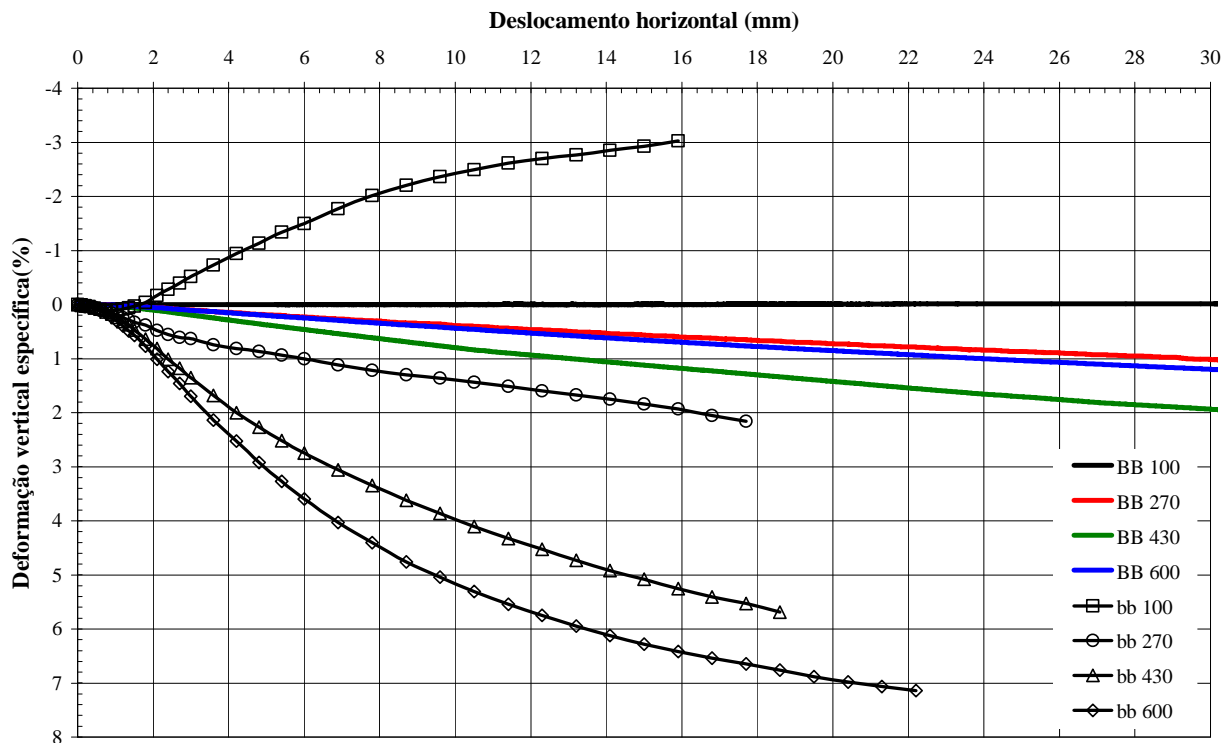


Figura 7.64 - Ensaios BB e bb: deslocamento horizontal vs deformação vertical

Na Figura 7.65 são apresentadas as envoltórias de ruptura referentes aos ensaios de grandes e pequenas dimensões

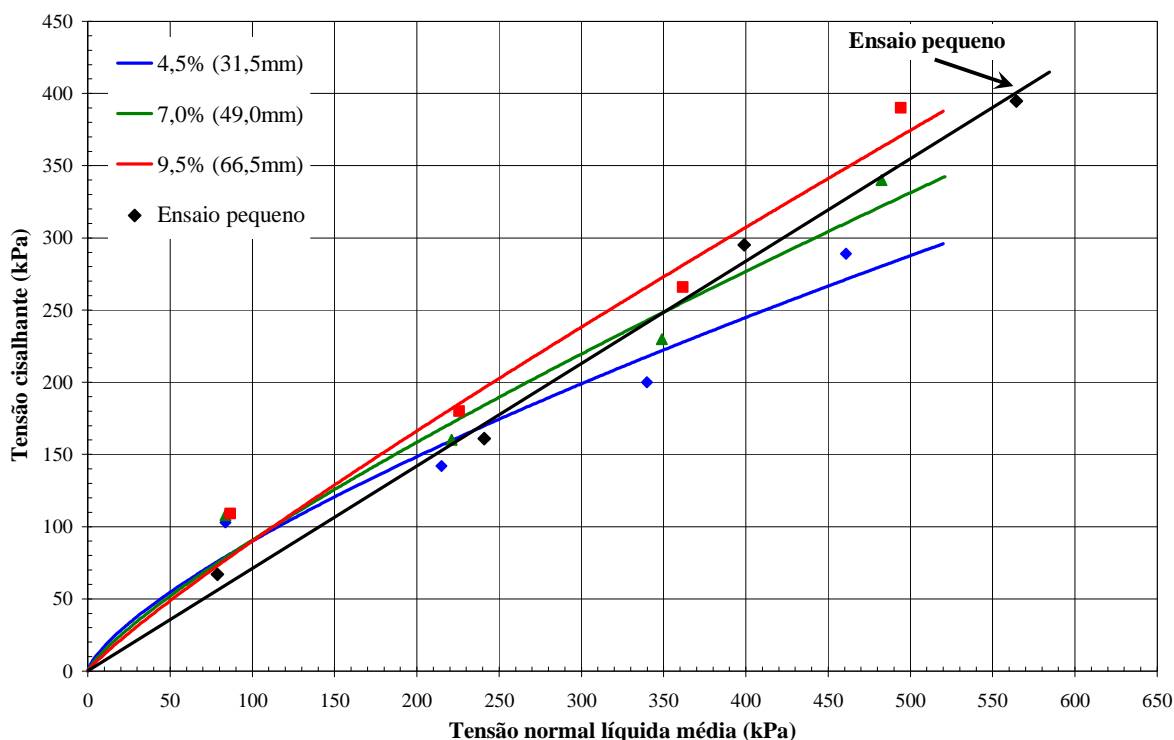


Figura 7.65 - Ensaios BB e bb: envoltórias de ruptura

Na Figura 7.65 verifica-se que as envoltórias de ruptura dos ensaios de grandes dimensões tendem para mesma inclinação da envoltória dos ensaios pequenos, de  $35,4^\circ$ , a medida que aumenta a deformação cisalhante específica, de 4,5 para 9,5%. A envoltória para deformação de 9,5% possui inclinação média de  $34,4^\circ$  no segmento entre tensões normais de 250 e 500kPa.

A principal diferença entre os resultados reside na tendência curva das envoltórias de grandes dimensões, em comparação com a tendência linear da envoltória dos ensaios de pequenas dimensões. Para tensões normais abaixo de 100kPa, aproximadamente, o ângulo de atrito é significativamente maior nas envoltórias de grandes dimensões. Em 50kPa, por exemplo, a inclinação da envoltória de 9,5% é de  $41,0^\circ$  (para outros valores de tensão normal, ver Figura 7.51).

#### 7.5.12. Comparação com resultados da bibliografia

Comparando-se os resultados das envoltórias de ruptura obtidas com ensaios de grandes dimensões com os dados existentes na bibliografia, percebe-se que os valores de ângulo de atrito interno dos rejeitos Barro Branco são inferiores aos obtidos por outros pesquisadores para pedregulhos e enrocamentos. Isso ocorre para diferentes estados de tensão e origens litológicas.

A Figura 7.66 reapresenta a Figura 3.1, agora inserindo os resultados obtidos com o rejeito Barro Branco, para a envoltória de 9,5% de deformação cisalhante específica. A Figura 3.1, apresentada anteriormente no Capítulo 3, resume muitas das pesquisas já realizadas, indicando, para diversos materiais, a variação do ângulo de atrito interno efetivo ( $\phi'$ ) com a tensão normal efetiva atuante no plano de ruptura ( $\sigma'$ ). Esses dados foram obtidos por meio de ensaios de compressão triaxial. Verifica-se que os valores de ângulo de atrito interno do rejeito se situam significativamente abaixo do limite inferior médio proposto por Maia (2001) (estado fofo, granulometria uniforme e partículas de baixa resistência). Esse fato ocorre apesar de que: a) o rejeito ensaiado não estava no estado fofo, mas compacto, com densidade relativa de 80,7% e b) os ensaios de cisalhamento direto geralmente resultam em  $\phi'$  maiores que os ensaios de compressão triaxial (ver item 3.3.2).

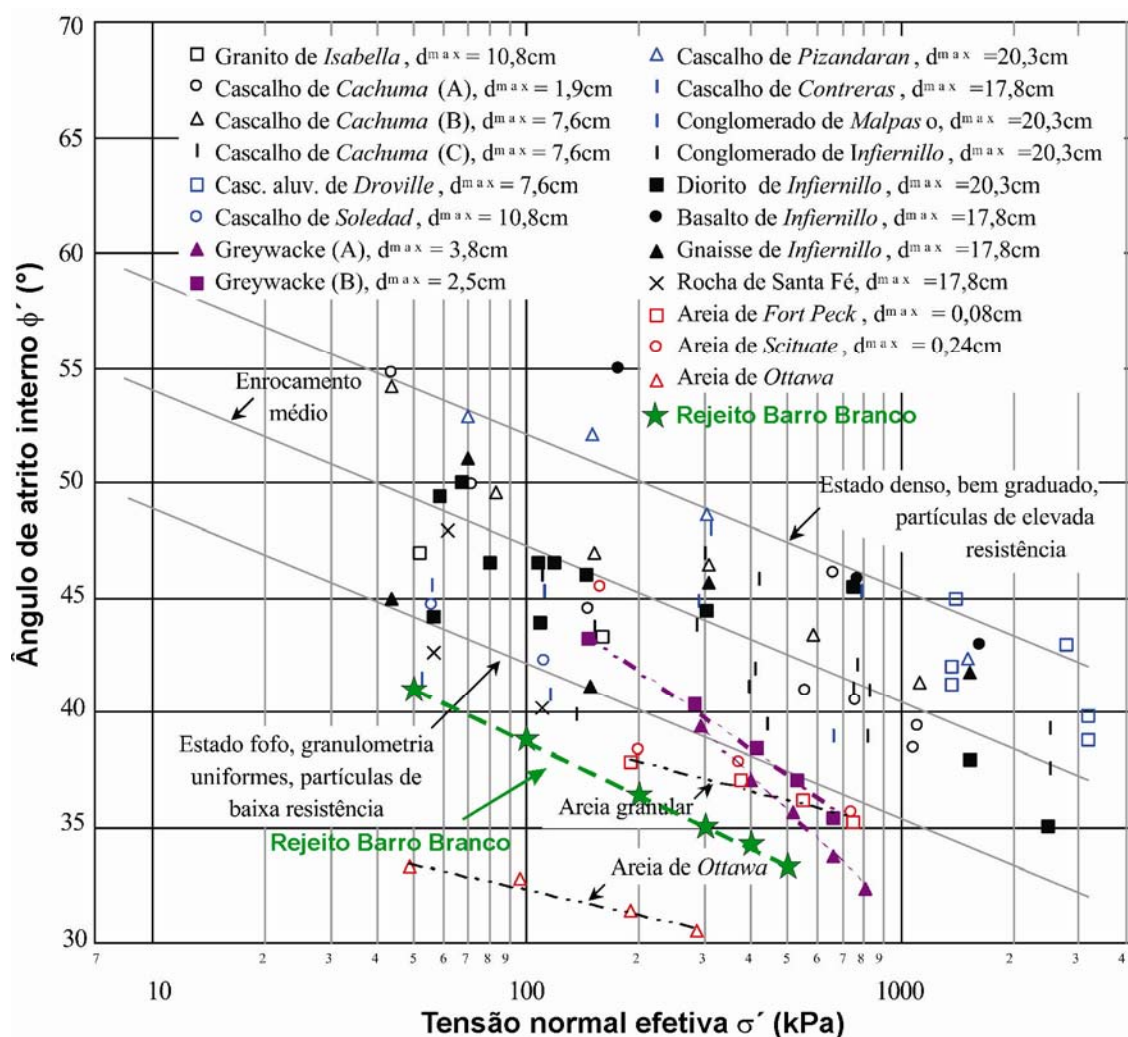


Figura 7.66 – Comparação de ângulo de atrito interno do Rejeito Barro Branco com dados da bibliografia (modificado de Maia, 2001)



Embora os resultados da Figura 3.1 tenham sido obtidos por meio de ensaios de compressão triaxial, mesmo assim optou-se por compará-los com os resultados obtidos na presente pesquisa.

A Tabela 7.19 apresenta uma comparação, para diferentes tensões normais efetivas, entre os ângulos de atrito internos efetivos obtidos com rejeito Barro Branco (envoltória de 9,5% de deformação cisalhante específica) e o limite inferior proposto por Maia (2001) (estado fofo, granulometria uniforme e partículas de baixa resistência).

Tabela 7.19 – Comparação de ângulos de atrito interno efetivos

Tensão normal efetiva ( $\sigma'$ ) (kPa)	Ângulo de atrito interno efetivo ( $\phi'$ ) (°)	
	Rejeito Barro Branco	Limite inferior Maia (2001)
50	41,0	44,3
100	38,8	42,5
200	36,4	40,0
300	35,2	38,9
400	34,4	38,0
500	33,8	37,6

## CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 8.1. INTRODUÇÃO

Esta pesquisa teve por objetivo a determinação de parâmetros de compressibilidade e resistência de rejeitos de beneficiamento de carvão mineral da bacia carbonífera catarinense, utilizando equipamentos laboratoriais de grandes dimensões. Para isso, foi determinada a massa específica aparente seca de rejeitos de dois depósitos em atividade. Os corpos de prova de ensaios de compressão unidimensional e cisalhamento direto foram compactados no mesmo índice de vazios e grau de saturação de campo. Foram estudados somente rejeitos não intemperizados.

Os ensaios de compressão unidimensional foram realizados com rejeitos Barro Branco e Bonito, os dois tipos mais comuns na região estudada. Os ensaios de cisalhamento direto foram executados somente com rejeitos Barro Branco.

Foi projetado, construído, testado e utilizado um equipamento de cisalhamento direto de grandes dimensões, com capacidade para ensaiar corpos de prova cúbicos de  $70 \times 70 \times 70$  cm.

Além dos ensaios de grandes dimensões, foram também realizados ensaios de pequenas dimensões, com curvas granulométricas paralelas às de campo, com o objetivo de avaliar a influência das dimensões dos equipamentos e da modelação da granulometria nos resultados.

### 8.2. CONCLUSÕES GERAIS

As curvas de compressibilidade apresentaram ponto de inflexão bem definido, comportamento incomum para pedregulhos. As curvas deformação cisalhante específica *versus* tensão cisalhante também apresentaram ponto de inflexão bem definido. Acredita-se que estes dois fenômenos estejam diretamente relacionados com a quebra de partículas, de baixa resistência mecânica, compostas principalmente por siltitos, argilitos e folhelhos. Os resultados de granulometria antes e depois dos ensaios indicaram alto grau de fraturamento. Provavelmente, o fator que rege o comportamento mecânico dos rejeitos é, preponderantemente, a quebra de partículas. Isso mesmo para tensões de confinamento baixas, da ordem de 100 kPa.

### 8.3. CONCLUSÕES ESPECÍFICAS

#### 8.3.1. Compressibilidade

Foram realizados dois ensaios de compressão unidimensional de grandes dimensões, um para rejeito Barro Branco e outro para rejeito Bonito. Este último apresentou maior

compressibilidade que o primeiro. O ponto de inflexão da curva de compressibilidade é bem definido para os dois materiais, mas ocorreu com tensão vertical mais baixa para o rejeito Bonito, em relação ao Barro Branco. Além disso, o grau de fraturamento  $B_g$  médio do Bonito foi maior que o do Barro Branco, respectivamente, 18,4 e 13,9%. Acredita-se que a maior compressibilidade e ponto de inflexão com tensão vertical mais baixa do rejeito Bonito sejam causados pela menor resistência das partículas. Os pontos de inflexão possivelmente estão relacionados com o início da quebra de grande quantidade de partículas, resultando em aumento significativo da compressibilidade do meio granular.

Nas curvas deformação vertical específica vs tensão vertical líquida média também podem ser observados os pontos de inflexão supracitados. Possivelmente, a progressiva diminuição da taxa de deformação vertical do rejeito Bonito, para tensões acima de 400kPa, esteja relacionada com menor quebra de partículas a partir deste ponto, pois a maior parte das partículas já deveriam ter quebrado na fase inicial do ensaio.

Os coeficientes de empuxo no repouso  $K_0$  foram, em média, maiores para o rejeito Barro Branco, tanto no carregamento como no descarregamento.

Nos ensaios de pequenas dimensões, tanto o rejeito Barro Branco como o Bonito apresentaram menor compressibilidade em relação aos ensaios de grandes dimensões. Além disso, os pontos de inflexão das curvas de compressibilidade foram menos nítidos. Possivelmente, a diminuição do tamanho máximo de partículas tenha causado: a) redução das forças de contato entre partículas e b) diminuição da quantidade e significância dos planos de franqueza para cada partícula. A consequência disso foi a menor influência da quebra de partículas no comportamento do meio granular.

Acredita-se que o rejeito Bonito tenha sofrido menor influência da redução do tamanho máximo de partículas, fazendo com que o ponto de inflexão da curva de compressibilidade tenha ocorrido em tensões semelhantes para os ensaios grandes e pequenos. A causa disso seria a menor resistência das partículas.

### **8.3.2. Resistência ao cisalhamento**

Foram realizados cinco ensaios de cisalhamento direto de grandes dimensões, todos com rejeito Barro Branco, dos quais um não pôde ser concluído. As curvas deformação cisalhante específica vs tensão cisalhante dos quatro ensaios concluídos apresentaram trecho inicial com inclinação elevada e com ponto de inflexão, mais bem definido para tensões normais menores. Após este ponto, as tensões cisalhantes aumentaram lentamente, chegando a estabilizar somente

para o ensaio com tensão normal de 100kPa. Acredita-se o ponto de inflexão esteja relacionado com quebras de partículas: antes pouca quebra e após, quebra acentuada. O fato da tensão cisalhante correspondente ao ponto citado ser semelhante para os quatro ensaios concluídos corrobora para essa hipótese. Possivelmente, ocorrem dois fenômenos: a) até o ponto de inflexão o fator que rege a resistência do meio granular é a resistência das partículas e b) após o ponto, é o atrito devido ao deslizamento e rolamento entre partículas o responsável pela resistência do meio. Ajuda a sustentar essa hipótese o fato do ponto de inflexão ter ocorrido com deformações cisalhantes muito baixas, da ordem de 0,2% ou 1,4mm.

Ocorreu acentuada quebra de partículas durante os ensaios, principalmente na região do plano de cisalhamento. Verificou-se que quanto maior a tensão normal aplicada mais bem graduado o material se torna após o ensaio.

As envoltórias de rupturas foram determinadas utilizando critérios de deformação cisalhante, já que em somente um dos quatro ensaios concluídos as tensões cisalhantes chegaram a estabilizar. Embora tenha ocorrido significativa dispersão dos resultados, verificou-se tendência não-linear das mesmas.

Os resultados dos ensaios de pequenas dimensões apresentaram diferenças significativas em relação aos de grandes dimensões. Para tensões normais baixas os primeiros indicaram menores resistências que os segundos. Acredita-se isto deve-se ao fato de, nos ensaios pequenos, o atrito entre partículas reger o comportamento do meio granular mesmo com tensões normais baixas. Já nos ensaios grandes, com estado de tensão semelhante, é a resistência das partículas a principal responsável pela resistência do meio granular. Para tensões normais mais elevadas, nos dois casos é o atrito o principal responsável pela resistência do meio.

A envoltória de ruptura obtida com os ensaios pequenos indicou tendência linear.

Comparando-se os resultados dos ensaios executados com os existentes na bibliografia, verificou-se que o rejeito Barro Branco possui ângulo de atrito interno efetivo bastante reduzido.

#### **8.4. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

Com base nos resultados obtidos e em informações empíricas de campo, são indicadas a seguir algumas sugestões para pesquisas futuras.

Esta pesquisa foi realizada com rejeitos não intemperizados, de produção recente. Observações de campo indicam que as características físicas e mecânicas dos rejeitos são fortemente afetadas pelo intemperismo, em períodos de tempo relativamente curtos. Sugere-se que sejam realizados ensaios mecânicos com rejeitos em diferentes graus de alteração. Desse

modo, poderá ser avaliado comportamento de depósitos de rejeitos a longo prazo. Também sugere-se avaliar o efeito do tipo isolamento de rejeitos, tal como hoje é feito, por exemplo, na alteração dos mesmos.

Os ensaios de compressão unidimensional e cisalhamento direto foram realizados com corpos de prova não-saturados. Sugere-se determinar o efeito da saturação completa nas características de compressibilidade e resistência. Também recomenda-se avaliar possíveis efeitos de colapso, causado por chuvas intensas ou deficiências nos sistemas de drenagem ou impermeabilização dos depósitos.

Recomenda-se ainda realizar ensaios com rejeitos em diferentes graus de compacidade, para avaliar seu o efeito no comportamento mecânico. Isto se justifica pelo fato das empresas que operam depósitos oporem resistência à compactação de rejeitos, dados os aumentos de custos envolvidos.

Sugere-se a realização de ensaios em equipamentos triaxiais, seguindo diferentes trajetórias de tensões. A compressibilidade poderia ser avaliada por meio de trajetória  $K_0$ , ou outra. Os parâmetros de resistência também poderiam ser melhor avaliados.

Recomenda-se realizar ensaios com equipamentos de dimensões intermediárias às dos utilizados na presente pesquisa. Assim, o efeito de escala poderia ser melhor detalhado. Também poderiam ser realizados ensaios com diferentes tamanhos máximos de partícula.

Além disso, dados de instrumentações de campo, comparados com resultados de ensaios de laboratório, poderiam ser muito úteis. Também poderiam ser estudados rejeitos de outras minas, com jazidas de diferentes características e com diferentes processos de beneficiamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado graúdo – determinação do índice de forma pelo método do paquímetro.** NBR 7809. Rio de Janeiro, 1983.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Análise granulométrica.** NBR 7181. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Grãos de solos que passam na peneira 4,8mm – Determinação da massa específica.** NBR 6508. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo - Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos.** NBR 12.004. Rio de Janeiro, 1991.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo - Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos.** NBR 12.051. Rio de Janeiro, 1990.

ABOARRAGE, A.M.; LOPES, R.C. **A borda leste da Bacia do Paraná: integração geológica e avaliação econômica.** Porto Alegre. DNPM/CPRM, 1986.

BECKER, E. **Strength and deformation characteristics of rockfill materials under plane strain conditions.** Thesis presented to the University of California at Berkeley, California, 1972. In partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.

BEER, F. P. et al. **Resistência dos Materiais,** São Paulo, Makron Books do Brasil. Porto Alegre, 1992.

BORTOT, A. **O uso do cadastro técnico multifinalitário na avaliação de impactos ambientais e na gestão ambiental na mineração de carvão – estudo de caso – Mina do Trevo, rio Albina – Siderópolis-SC.** Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, UFSC, 2000.

BORESI, A. et al. **Advanced mechanics of materials**. John Wiley & Sons, New York, 1993.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanço energético nacional 2005. Ano base 2004**. Rio de Janeiro, 2005.

BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL, **Geologia do Brasil**: texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais. Brasília, 1984.

BRAUNS, J.; REITH, H. **Testing the stress-strain properties and the shear strength of rockfill material**. Hydropower & Dams. Karlsruhe, Alemanha, 2000. p. 62-63.

CEA, J. C. **Resistencia al corte de escolleras obtenida a partir de ensayos de laboratorio**. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales e Puertos. Madrid, 1998.

CHARLES, J.A.; WATTS, K.S. **The influence of confining pressure on the shear strength of compacted rockfill**. Géotechnique, n. 30, London, 1980. p. 353-67.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM). **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil**. Criciúma, Folha SH.22-X-B. Estado de Santa Catarina. Escala 1:250.000. Brasília, 2000

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”**. Método de ensaio. ME 035/98. Rio de Janeiro, 1998.

DONAGHE, R.; COHEN, M. **Strength and deformation properties of rockfill**. U. S. Army Engineer. Technical report S-78-1. Vicksburg, 1978.

DOUGLAS, K.J. **The shear strength of rock masses**. Tese de doutorado, The University of New South Wales, Sydney, Australia, 2002.

FUMAGALLI, E. **Tests on cohesionless materials for rockfill dams**. Proc. of the ASCE, Journal of Soil Mechanics and Foundation. 1969. p. 313-330.

GORDON JR., M. **Classificação das formações gonduânicas do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Rio de Janeiro, DNPM/DGM, 1947.

GOTHE, C.A.V. **Avaliação dos impactos ambientais da indústria carbonífera nos recuos hídricos da região sul catarinense**. Dissertação de mestrado, Departamento de Geociências, UFSC, 1993.

HUMMES, R.A., MACCARINI, M. **Disposição de rejeitos de carvão mineral: uma avaliação dos critérios atuais**. 11º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, Florianópolis, 2005.

INDRARATNA, B.; WIJEWARDENA, L.S.S.; BALASUBRAMANIAM, A.S. **Large-scale triaxial testing of greywacke rockfill**. Géotechnique, n. 43, London, 1993. p. 37-51.

INDÚSTRIA CARBONÍFERA RIO DESERTO LTDA. **Relatório de Classificação de Resíduos da Mineração**. Relatório interno. Criciúma, 2005.

JICA – JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY, **The feasibility study on recuperation of mined-out areas in south region of Santa Catarina state, the Federal Republic of Brazil**. Main report. Japan, 1998.

KJAERNSLI, B.; SANDE, A. **Compressibility of some coarse grained materials**. Norwegian Geotechnical Institute. Pub. n° 66, 1963. p. 245-251.

KLEM, D.F.P. **Estruturação de um cadastro técnico histórico para análise física e ambiental de áreas de mineração de carvão**. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, UFSC, 1999.



LESLIE, D. **Relationships between shear strength, gradation and index properties of rockfill materials**. Specialty session n°13. 7<sup>th</sup> International Conferation on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico, 1969. p. 201-210.

MACCARINI, M., HUMMES, R.A., SIMON, V. **Alguns aspectos do comportamento mecânico de rejeitos de carvão mineral do sul de Santa Catarina**. IV Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, Curitiba, 2004.

MAIA, P.C.A. **Avaliação do comportamento geomecânico e de alterabilidade de enrocamentos**. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil, PUC – Rio, Rio de Janeiro, 2001.

MARSAL, R.J. **Mechanical properties of rockfill**. Embankment-Dam Engineering. Casagrande Volume, John Wiley & Sons, 1973.

MEDEIROS, R.A; THOMAZ FILHO, A. **Fácies e ambientes deposicionais da Formação Rio Bonito**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27, Aracaju, 1973. Anais v. 3, p. 3-12.

MENDONÇA, R.M.G. *et al.* **Avaliação de sistema de cobertura seca para região sul de Santa Catarina**. V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. Porto Alegre, 2003a.

MENDONÇA, R.M.G.; BORMA, L.S.; SOARES, P.S.M. **Caracterização do potencial de geração de acidez de resíduos de mineração de carvão**. V Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental. Porto Alegre, 2003b.

MILIOLI, G. **Adordagem ecossistêmica para a mineração: uma perspectiva comparatova para Brasil e Canadá**. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia de Produção, UFSC, 1999.

MORGENSTERN, N.R. ; TCHALENKO, J.S. **Microscopic structures in kaolin subjected to direct shear**. Géotechnique, n° 17, London, 1993. p. 309-328.

NEVES, E.M. das; VEIGA PINTO, A. Modelling collapse on rockfill dams. Computers and Geotechnics, 6, 1988. p. 131-153.

NEVES, E.M. das. **Algumas considerações sobre a mecânica dos enrocamentos.** Solos e Rochas, n.25, 2002, p. 161-203.

NICHIPOROVITCH, A.; RASSKAZOV, L. **Shearing strength of coarse shell materials.** Specialty session nº 13, 7<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, 1969. p. 211-216.

NORTON, R.L. **Machine design: an integrated approach.** Prentice-Hall New Jersey 1998.

ORTIZ, L.; TEIXEIRA, E.C. **Influência das atividades de processamento de carvão sobre a qualidade dos recursos hídricos superficiais.** Meio Ambiente e Carvão. FEPAM, Porto Alegre, 2002.

PACHECO, D. **Compressão unidimensional em enrocamento de riodacito e basalto: desenvolvimento do equipamento e realização de ensaios.** Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, UFSC, 2005.

QIAN, X., KOERNER, R.M., GRAY, D.H. **Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction.** Prentice Hall. New Jersey, 2002.

REDIVO, R.V. **Caracterização tecnológica do carvão das camadas Barro Branco e Bonito para fins energéticos na região de Criciúma – SC.** Dissertação de mestrado, Escola Politécnica, USP, 2002.

SCHNEIDER, R.L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R.A.; DAEMON, R.F.; NOGUEIRA, A.A. **Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, Porto Alegre, 1974. Anais v. 1, p. 41-65.

SPINELLI PINTO, L.F.; KAMPF, N., Contaminação dos solos construídos. **Meio Ambiente e Carvão.** FEPAM, Porto Alegre, 2002.

SOWERS, G.; WILLIAMS, R.; WALLACE, T. **Compressibility of broken rock and the settlement of rockfills**. Proc. 6<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 2. Montreal, 1965. p. 561-565.

SÜFFART, T.; CAYE, B. R.; DEEMON, R. F. **Projeto carvão bonito gaseificável: relatório final**. Volume 1. Ministério de Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. Porto Alegre, 1977.

TEICHMÜLLER, M. **Fluoreszenzmikroskopische andernungen von liptiniten und uitriniten mitzunehmendem inkohlungsgrad und ihre beziehungen zu bitmenbildung und verkokungsverhalten**. Geologisches Landesamt Nordrhein-Westfalen. Alemanha, 1982.

VEIGA PINTO, A. **Características de resistência e deformabilidade dos materiais de enrocamento**. Geotecnia, n. 37. Lisboa. 1979.

VEIGA PINTO, A. **Modelação de enrocamentos**. Geotecnia, n. 37. Lisboa. 1983.

VARGAS, C.G. **A disposição de resíduos sólidos em área degradada por rejeitos da mineração de carvão: análise do aterro controlado de Forquilha-SC**. Dissertação de mestrado, Departamento de Geociências, UFSC, 1998.

ZETA–IESA. **Projeto de recuperação de meio ambiente: depósito de rejeitos sólidos**. Florianópolis, 1983.

ZINGANO, A.C. **Modelamento Geomecânico para o Dimensionamento de Pilares de Carvão**. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia de Minas, UFRGS, Porto Alegre, 2002.

WHITE, I.C. **Relatório final da Comissão de Estudos das Minas de Carvão de Pedra do Brasil**. Rio de Janeiro, DNPM, 1908.

## APÊNDICE I – RESULTADOS DETALHADOS DOS ENSAIOS DE COMPRESSÃO UNIDIMENSIONAL

### I.1. INTRODUÇÃO

São apresentadas nas páginas seguintes as curvas tempo *vs* tensão vertical líquida média e tempo *vs* deformação vertical acumulada, para todos os estágios dos dois ensaios de compressão unidimensional de grandes dimensões. Optou-se por as curvas num mesmo gráfico para facilitar as análises, já que tensão e deformação têm relação direta. Também são apresentadas as curvas forças de atrito *vs* força vertical total para cada uma das três células de carga (ver item 6.4.1).

Nos primeiros estágios de carregamento de ambos os ensaios pode-se notar significativa oscilação da tensão vertical. Isso ocorre devido à pouca sensibilidade do atuador hidráulico para carga baixas em relação à sua capacidade máxima, de 1960kN. Em alguns estágios a variação atingiu valores da ordem de 8%.

### I.1. ENSAIO BARRO BRANCO

#### I.1.1. Curvas tempo *vs* tensão vertical líquida média *vs* deformação vertical acumulada

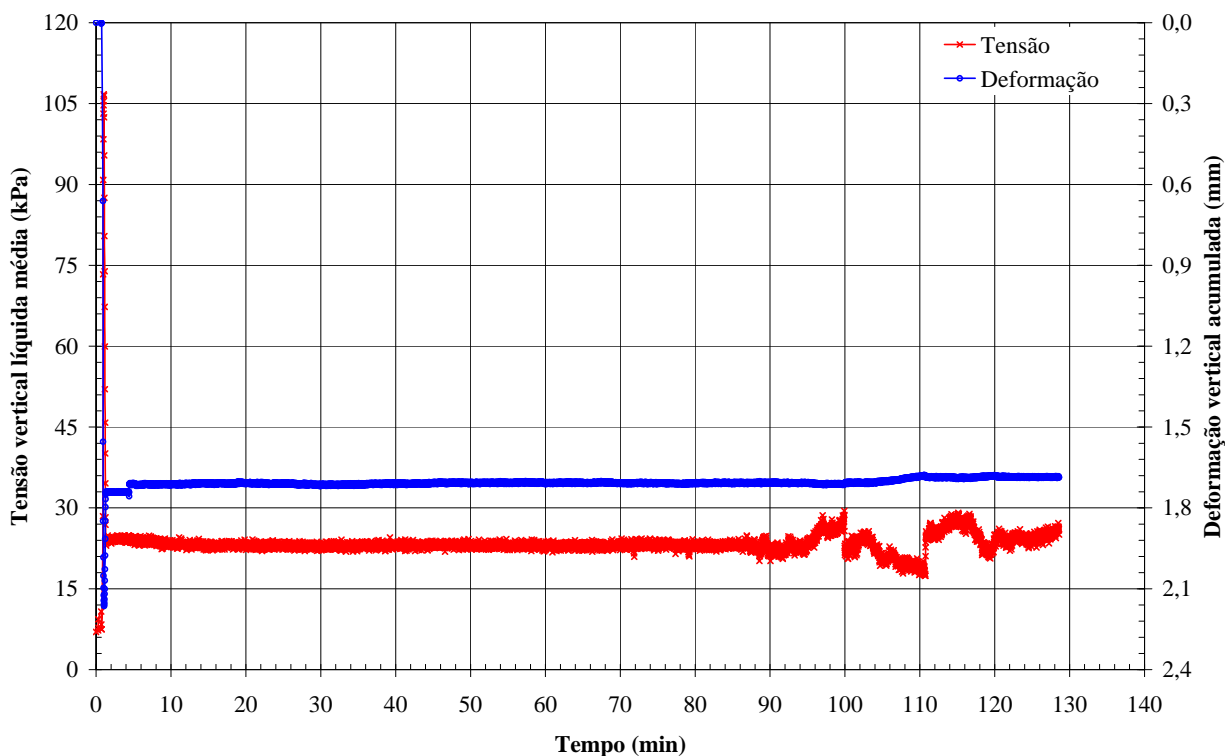


Figura I.1 - Ensaio Barro Branco: estágio 0, contato com o *top-cap*

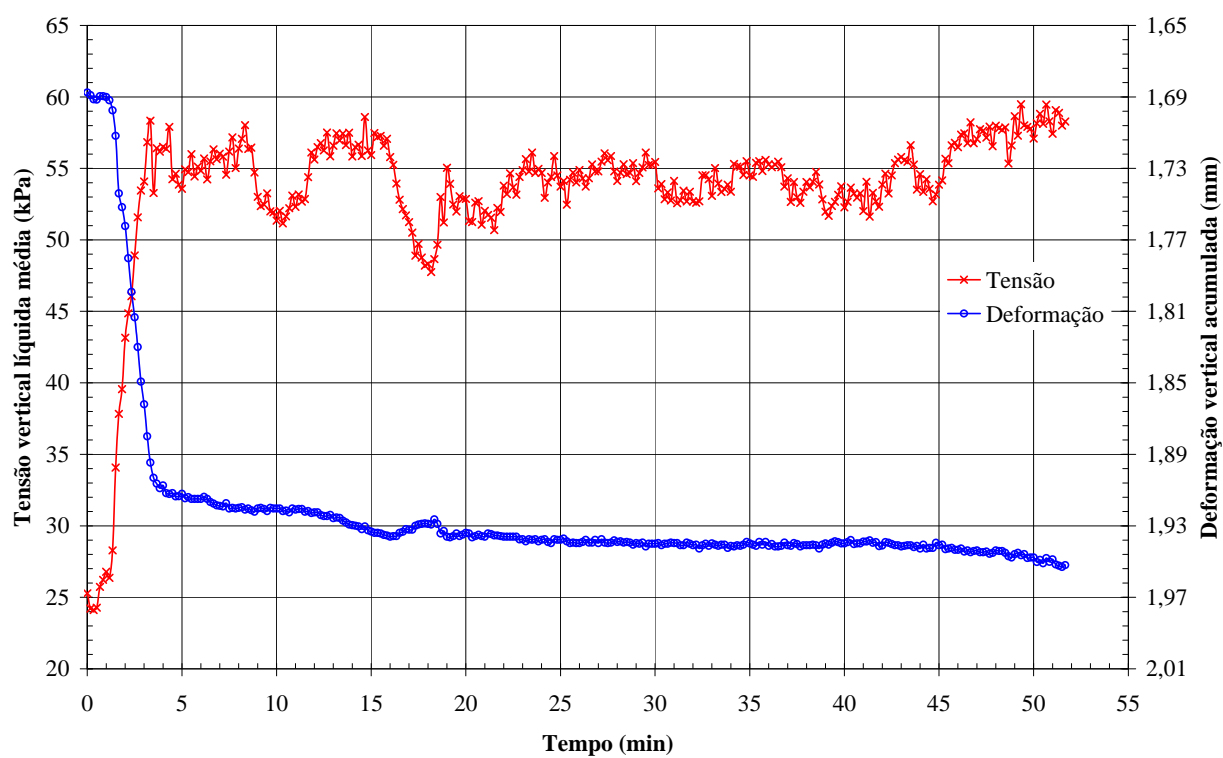


Figura I.2 - Ensaio Barro Branco: estágio 1 de carregamento

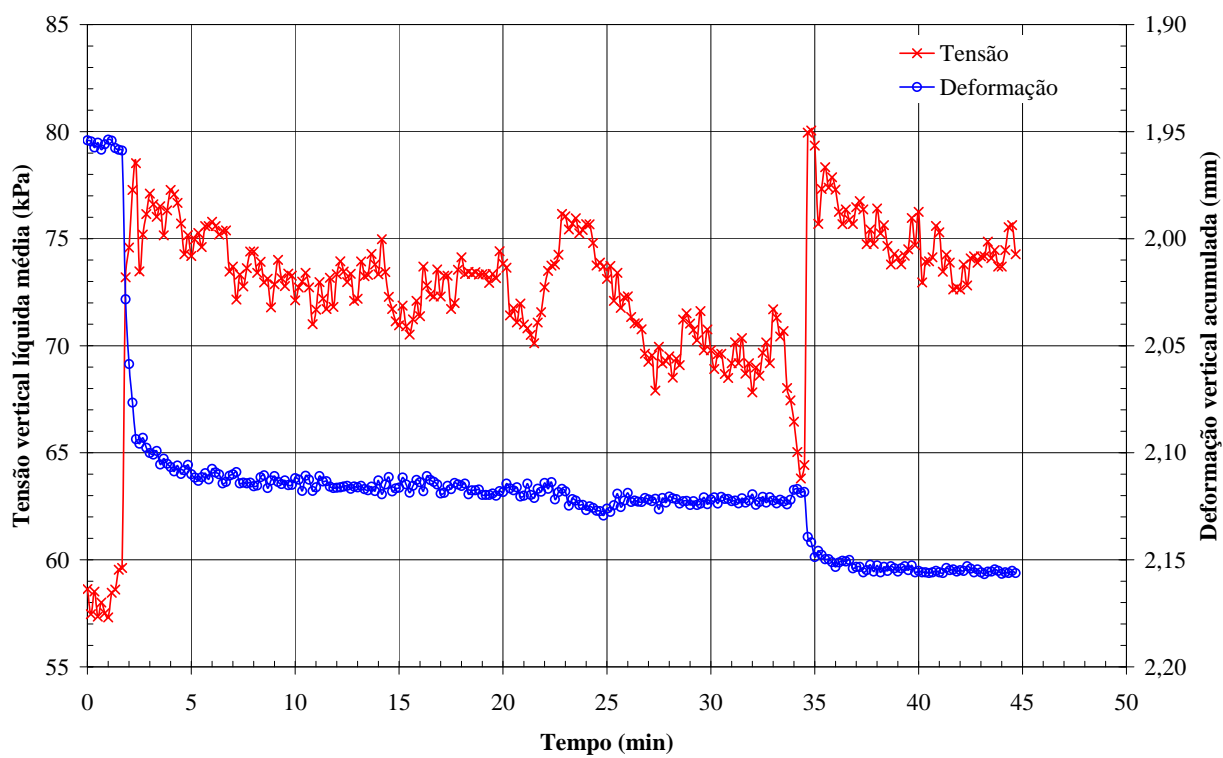


Figura I.3 - Ensaio Barro Branco: estágio 2 de carregamento

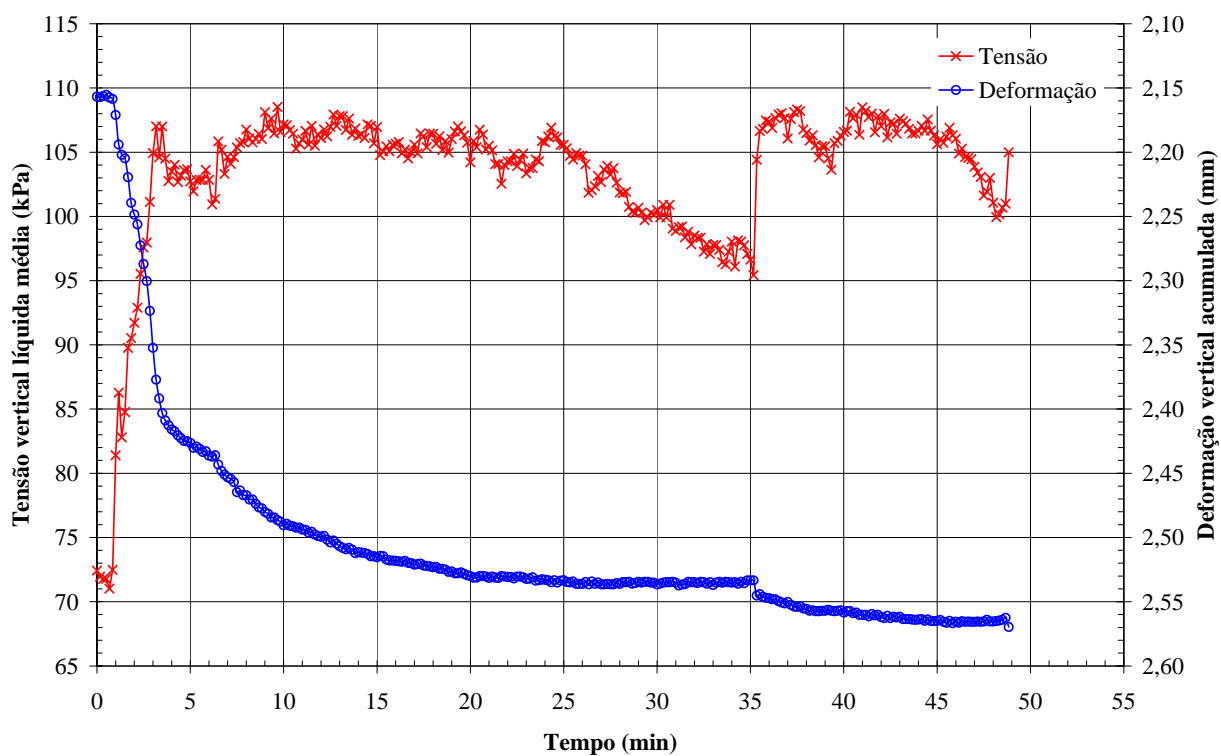


Figura I.4 - Ensaio Barro Branco: estágio 3 de carregamento

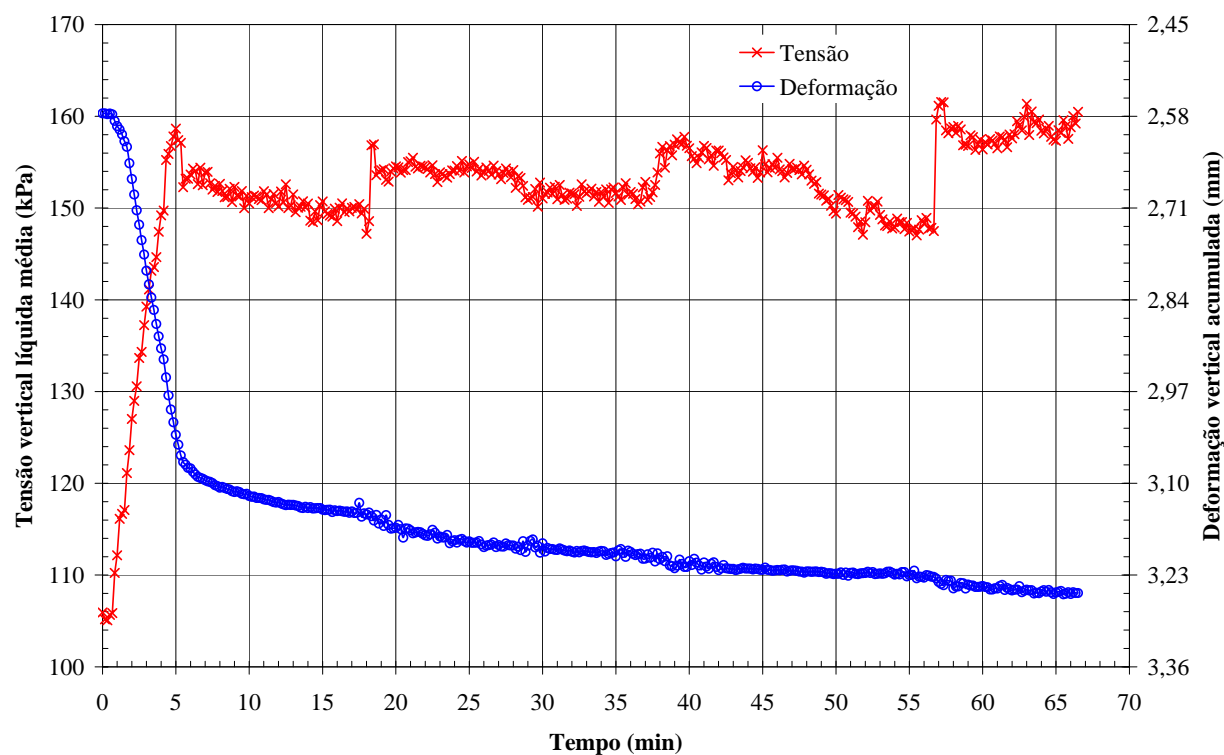


Figura I.5 - Ensaio Barro Branco: estágio 4 de carregamento

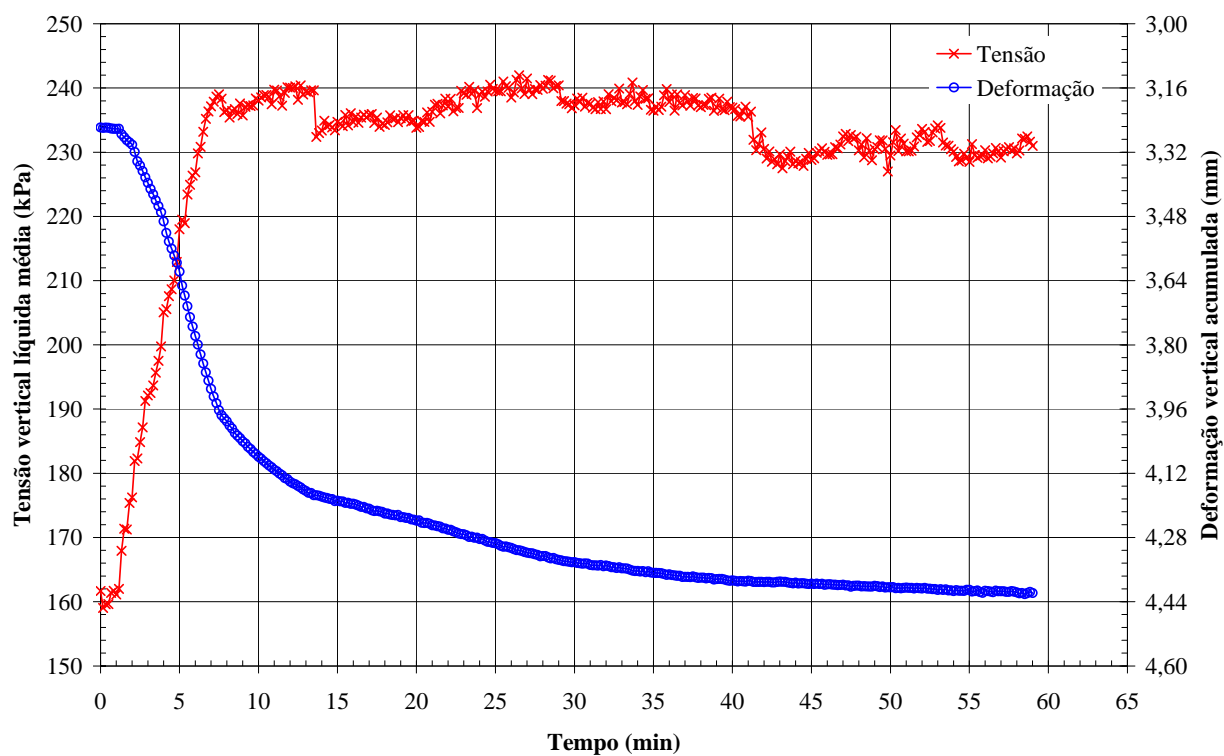


Figura I.6 - Ensaio Barro Branco: estágio 5 de carregamento

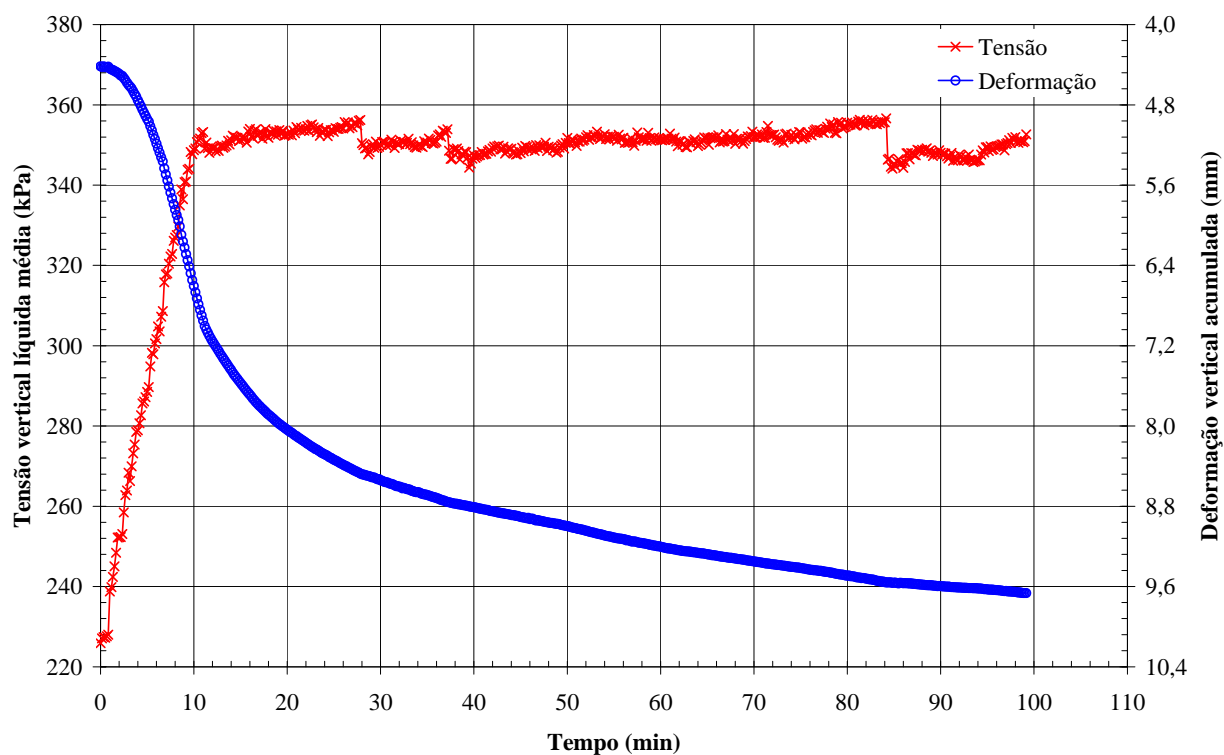


Figura I.7 - Ensaio Barro Branco: estágio 6 de carregamento

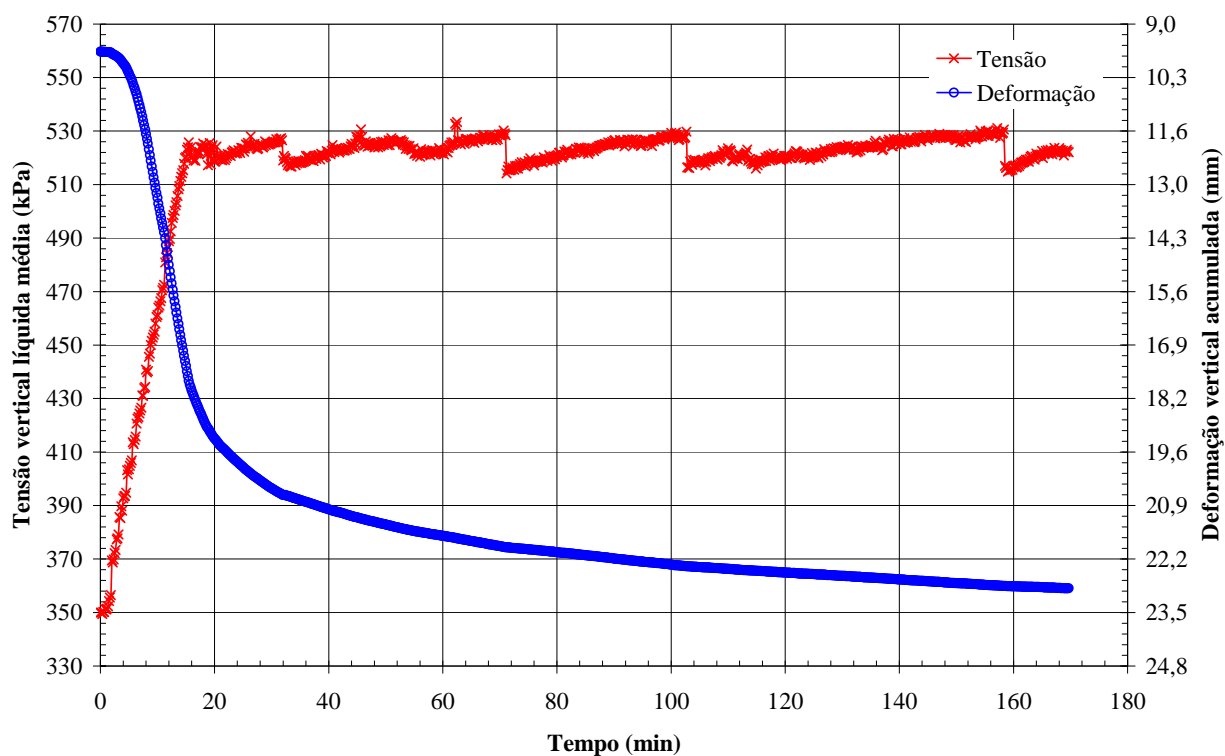


Figura I.8 - Ensaio Barro Branco: estágio 7 de carregamento

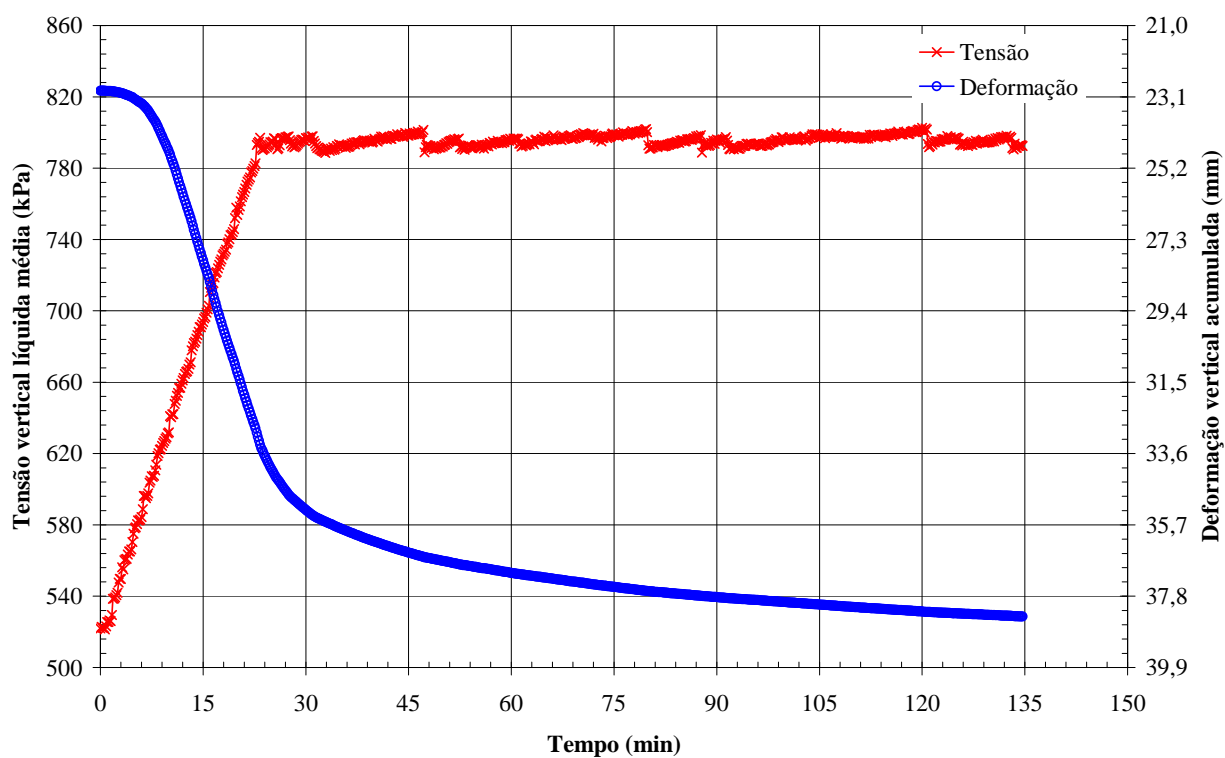


Figura I.9 - Ensaio Barro Branco: estágio 8 de carregamento



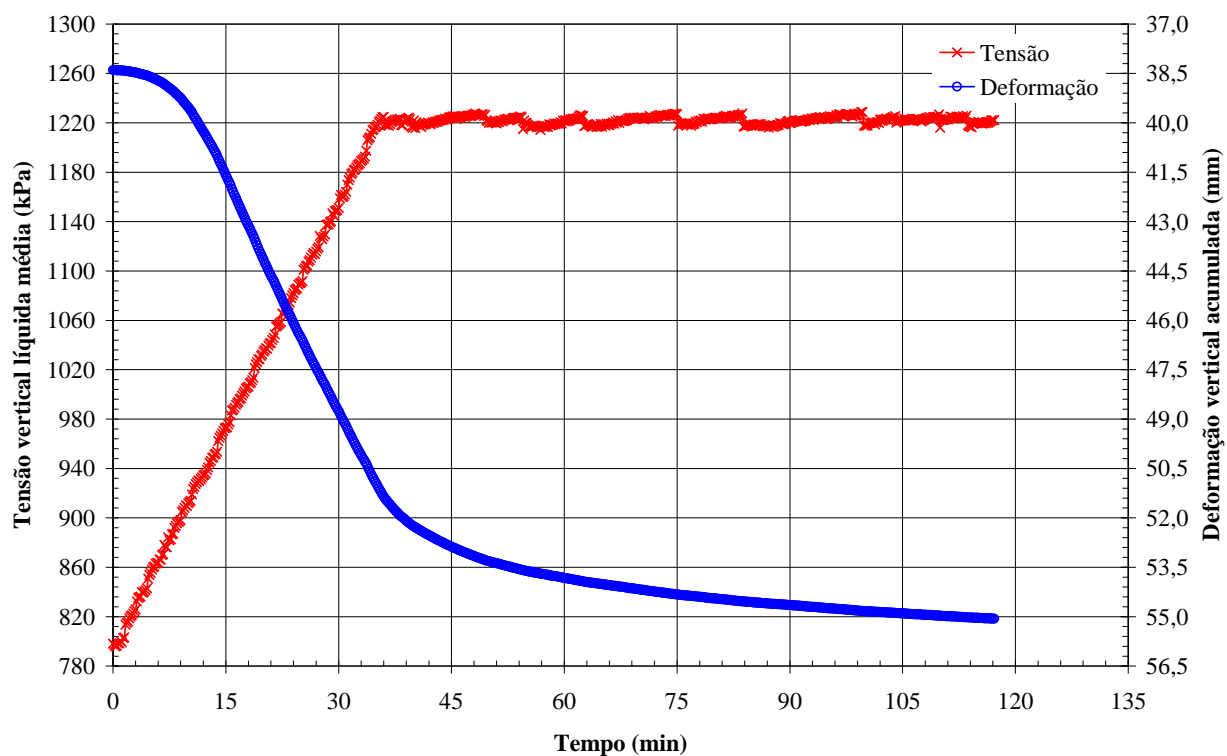


Figura I.10 - Ensaio Barro Branco: estágio 9 de carregamento

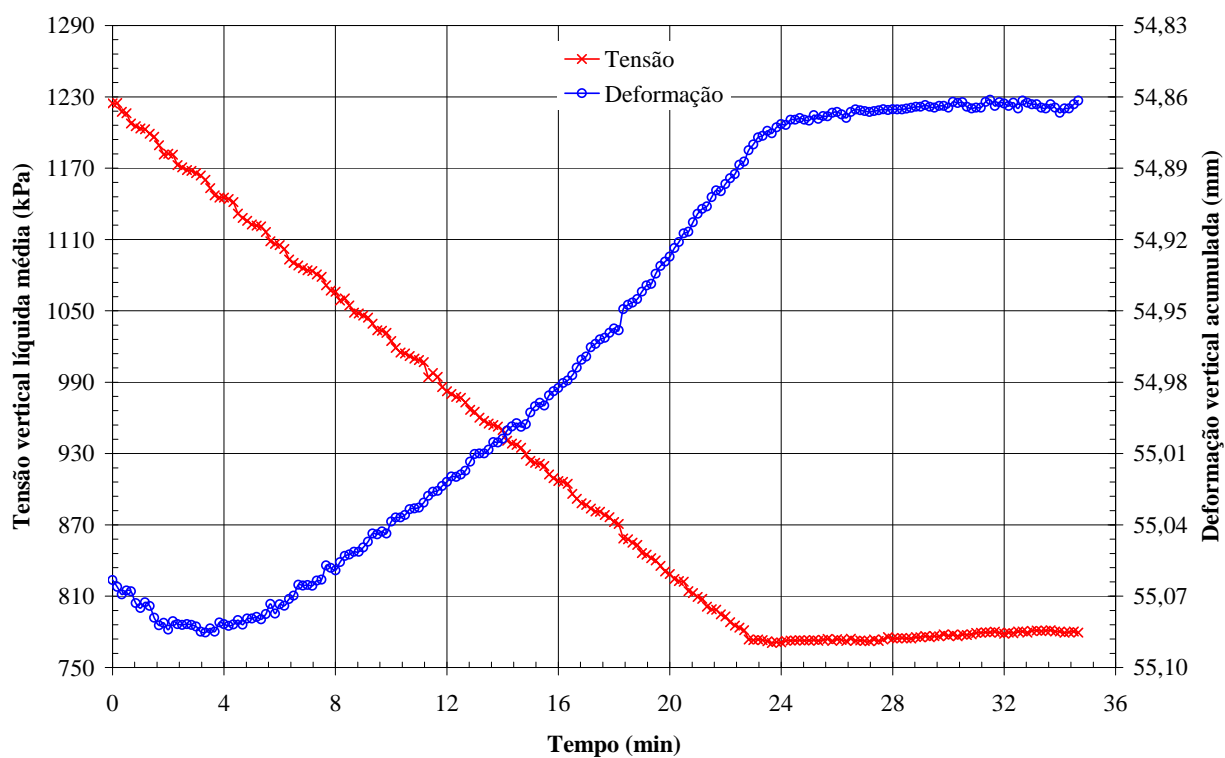


Figura I.11 - Ensaio Barro Branco: estágio 1 de descarregamento

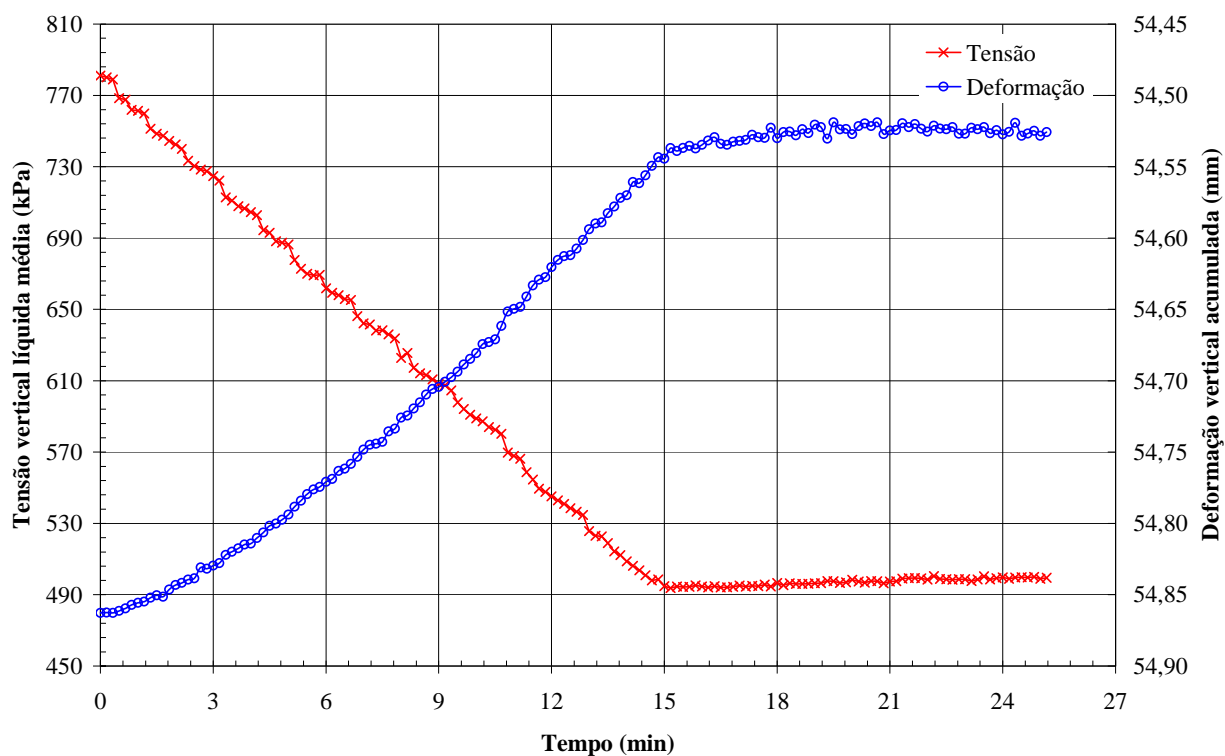


Figura I.12 - Ensaio Barro Branco: estágio 2 de descarregamento

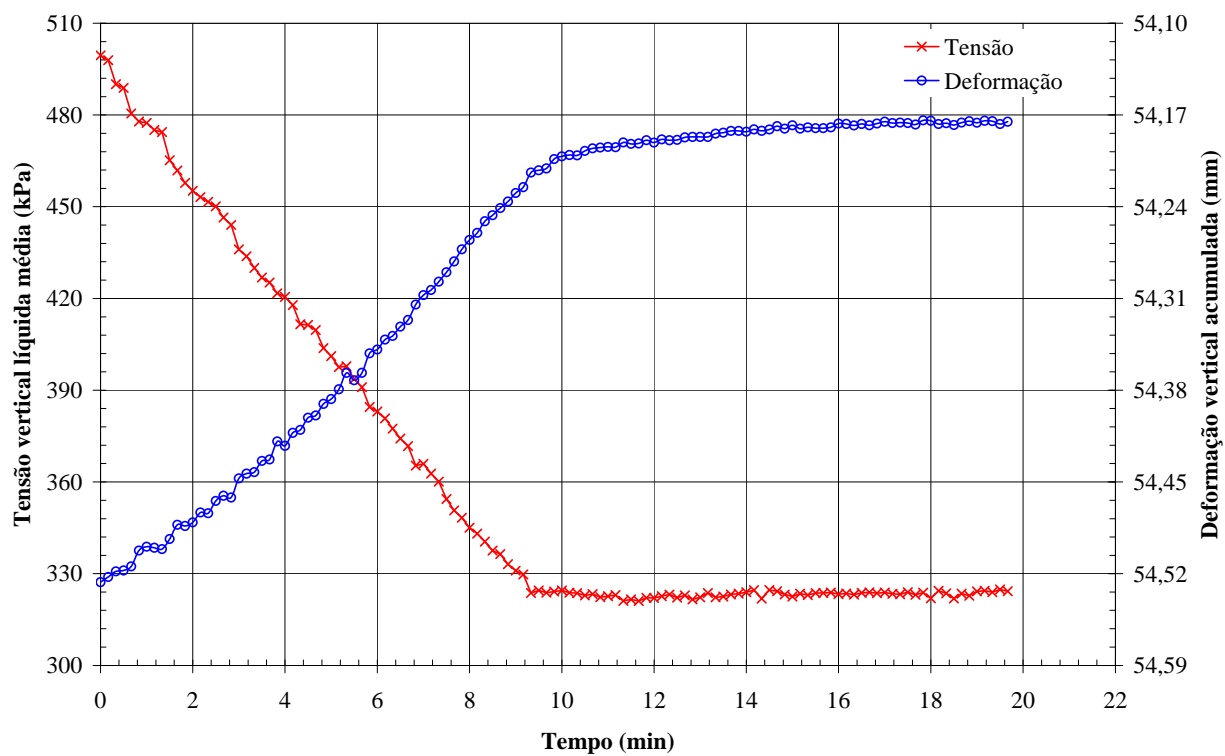


Figura I.13 - Ensaio Barro Branco: estágio 3 de descarregamento

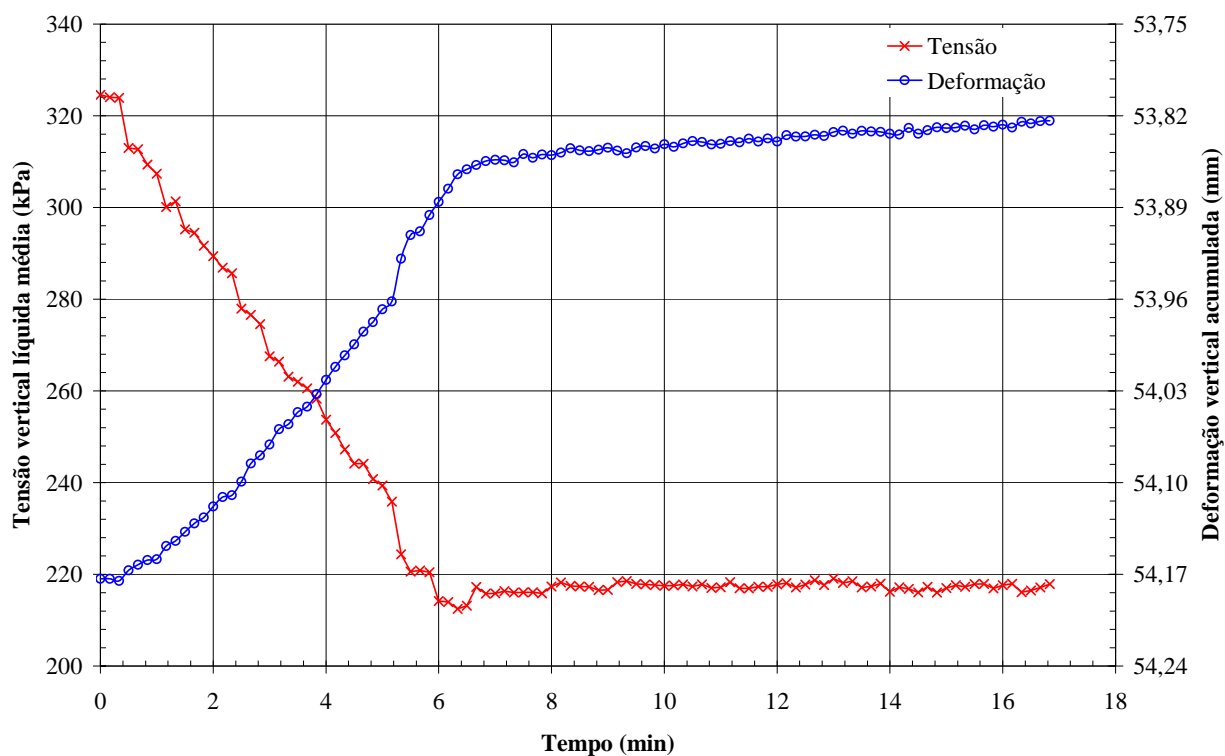


Figura I.14 - Ensaio Barro Branco: estágio 4 de descarregamento

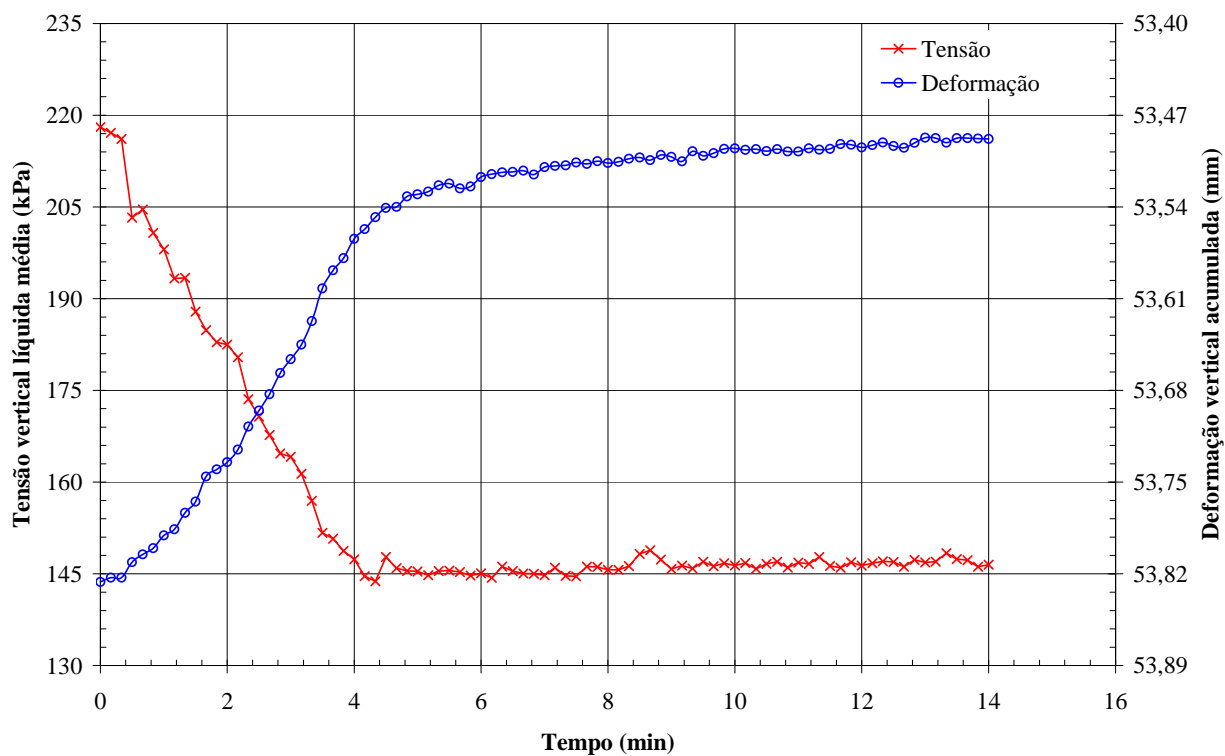


Figura I.15 - Ensaio Barro Branco: estágio 5 de descarregamento

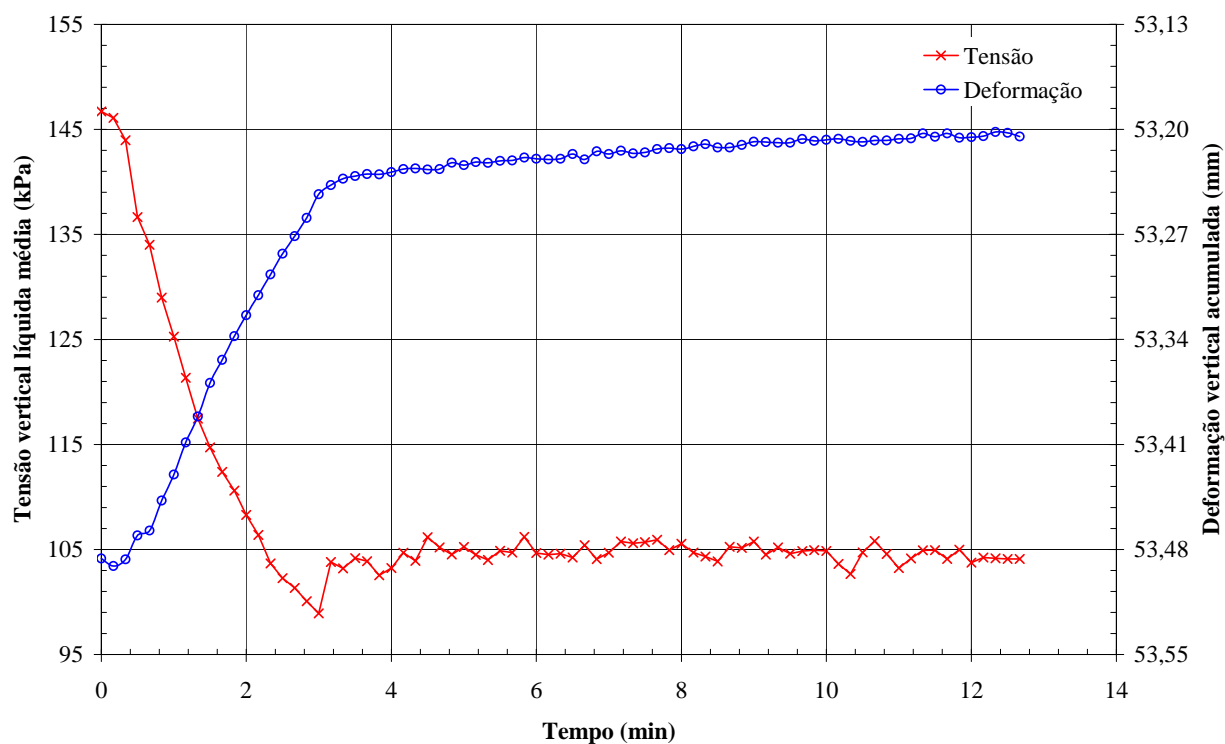


Figura I.16 - Ensaio Barro Branco: estágio 6 de descarregamento

### I.1.2. Curvas força de atrito vs força vertical total

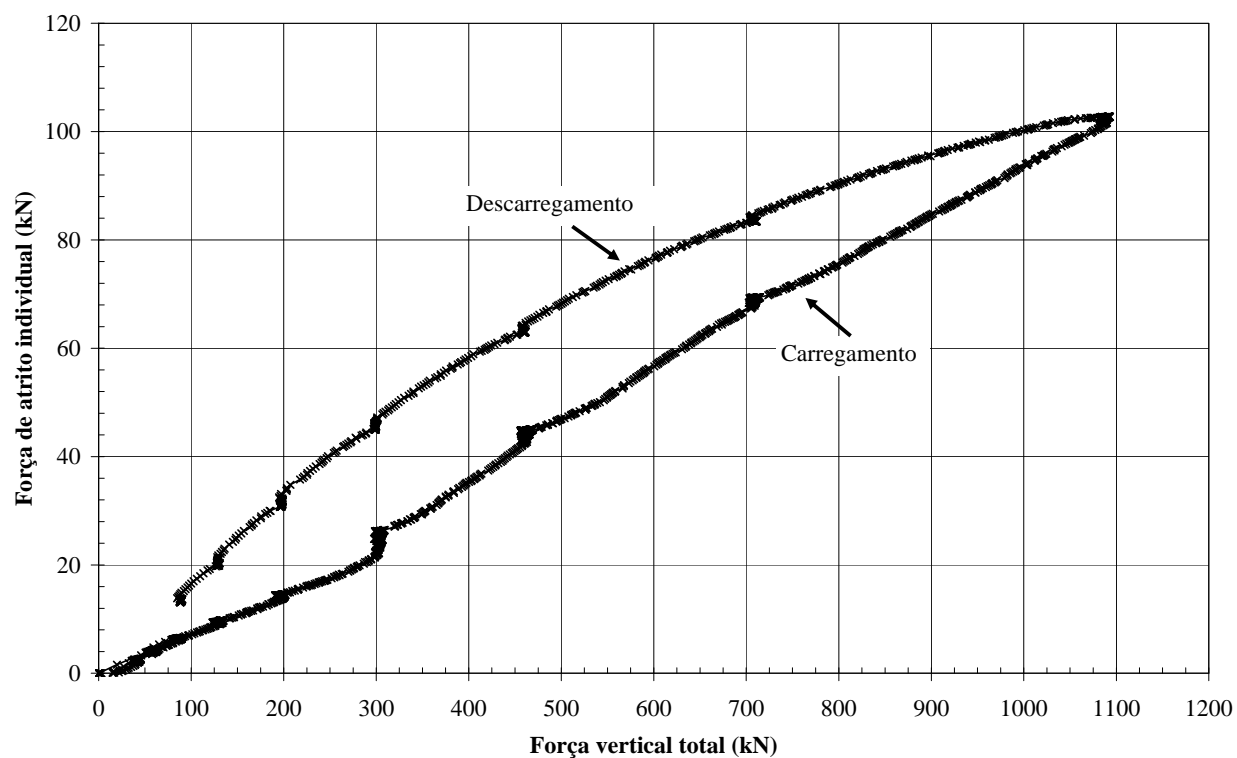


Figura I.17 - Ensaio Barro Branco: força de atrito medida pela Célula de Carga 1

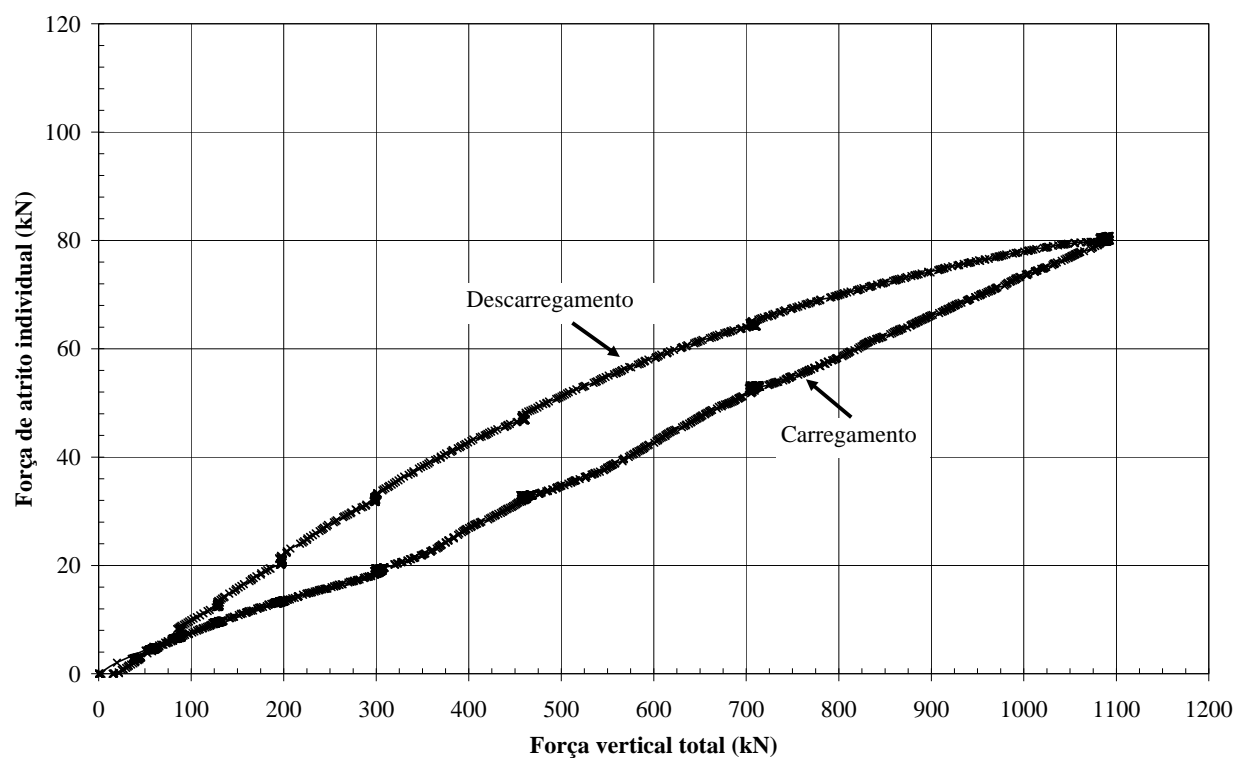


Figura I.18 - Ensaio Barro Branco: força de atrito medida pela Célula de Carga 2

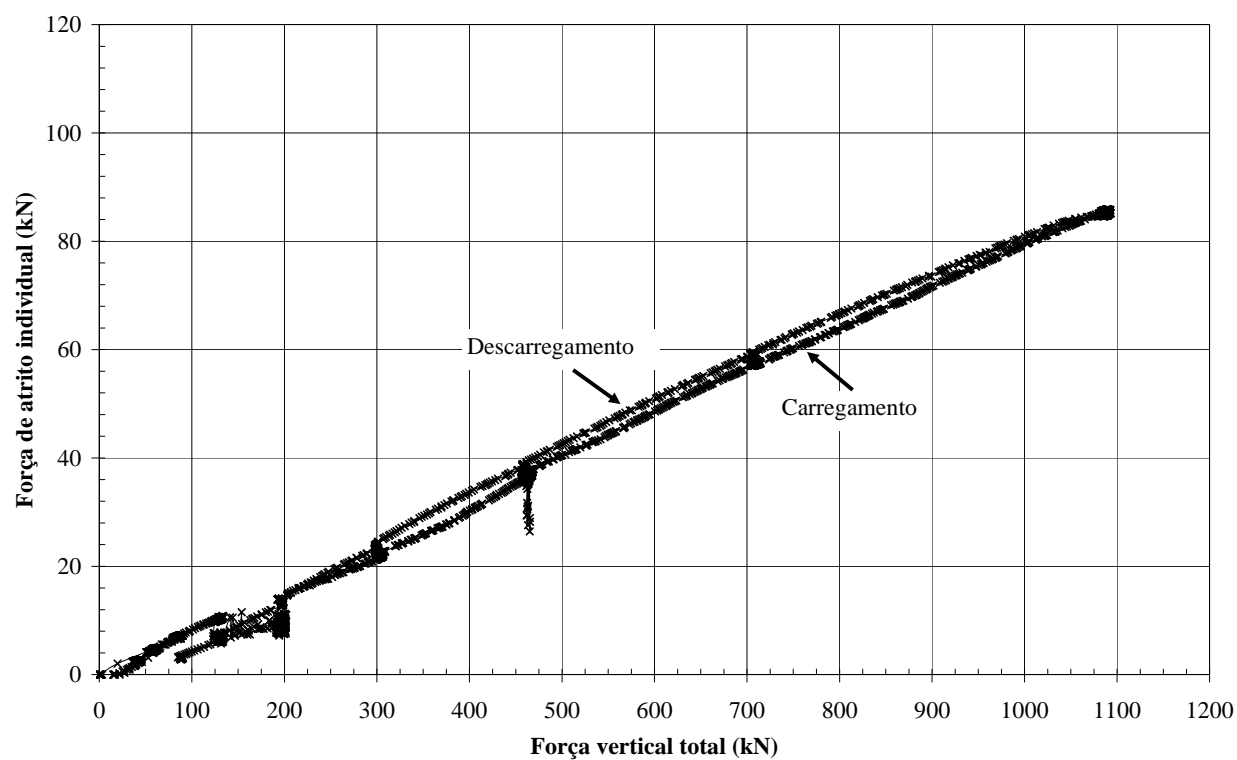


Figura I.19 - Ensaio Barro Branco: força de atrito medida pela Célula de Carga 3

## I.2. ENSAIO BONITO

### I.2.1. Curvas tempo vs tensão vertical líquida média vs deformação vertical acumulada

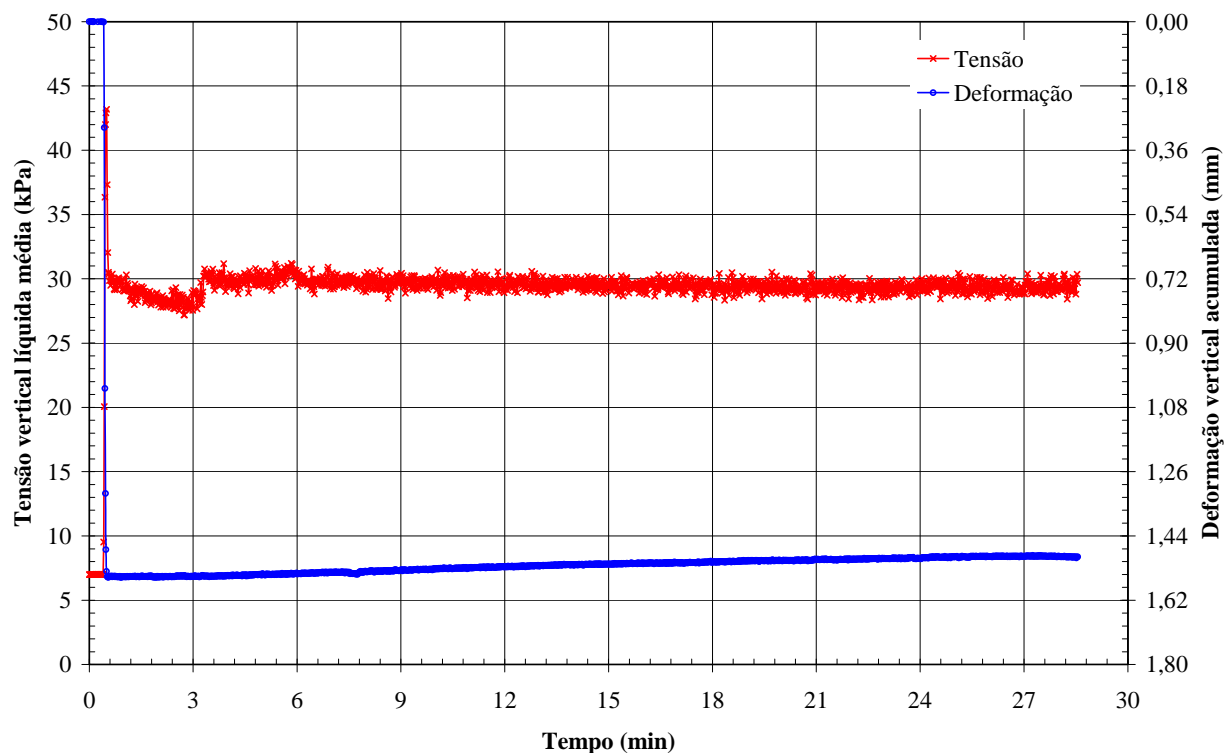


Figura I.20 - Ensaio Bonito: estágio 0, contato com o *top-cap*

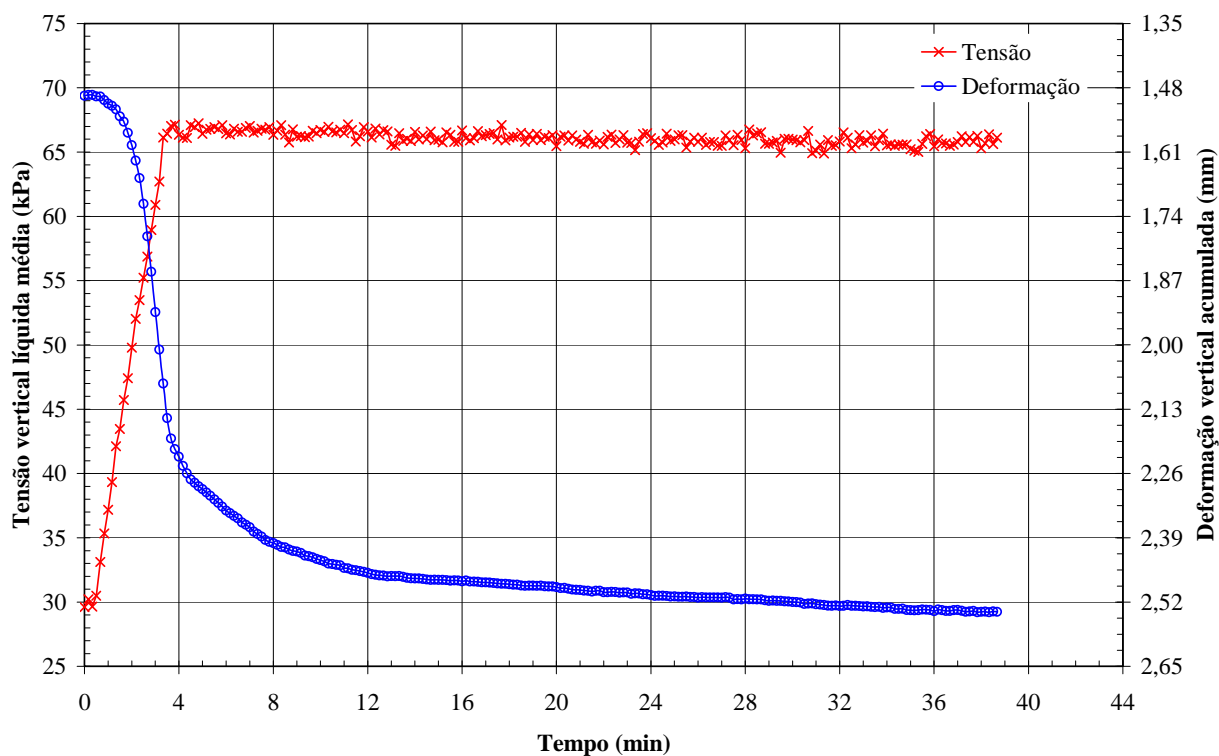


Figura I.21 - Ensaio Bonito: estágio 1 de carregamento

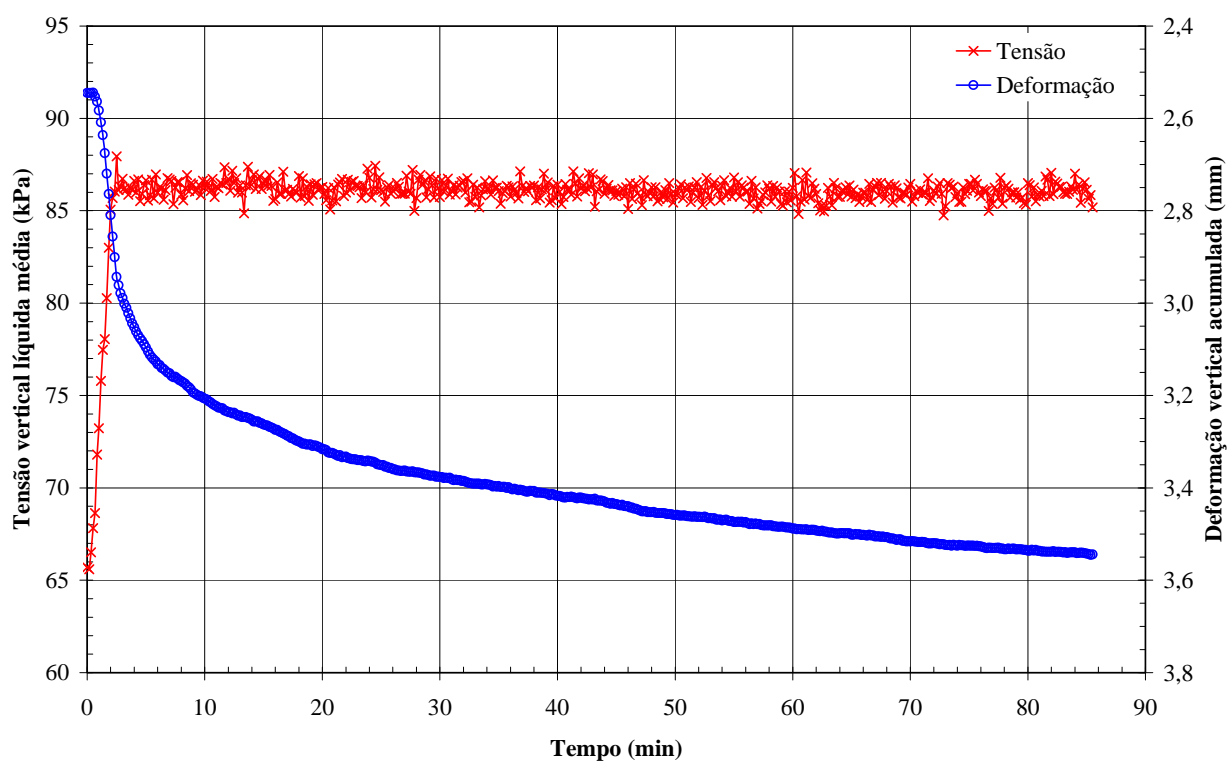


Figura I.22 - Ensaio Bonito: estágio 2 de carregamento

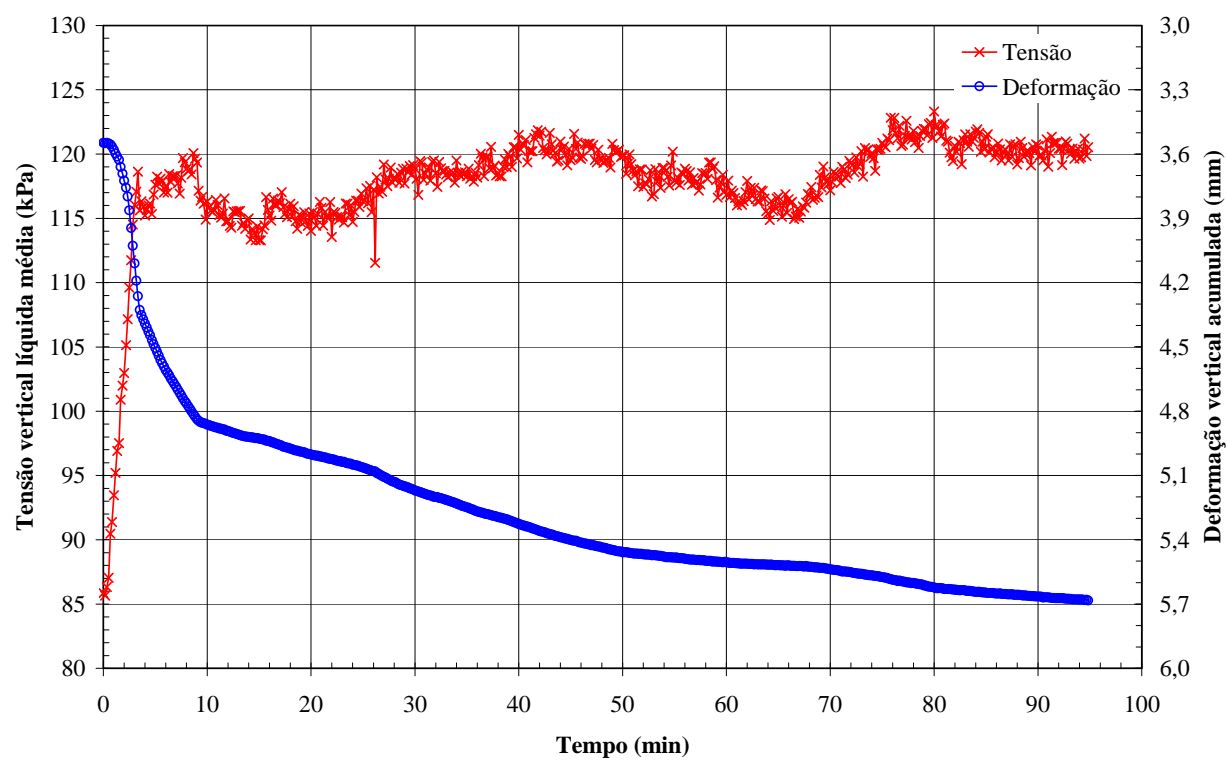


Figura I.23 - Ensaio Bonito: estágio 3 de carregamento

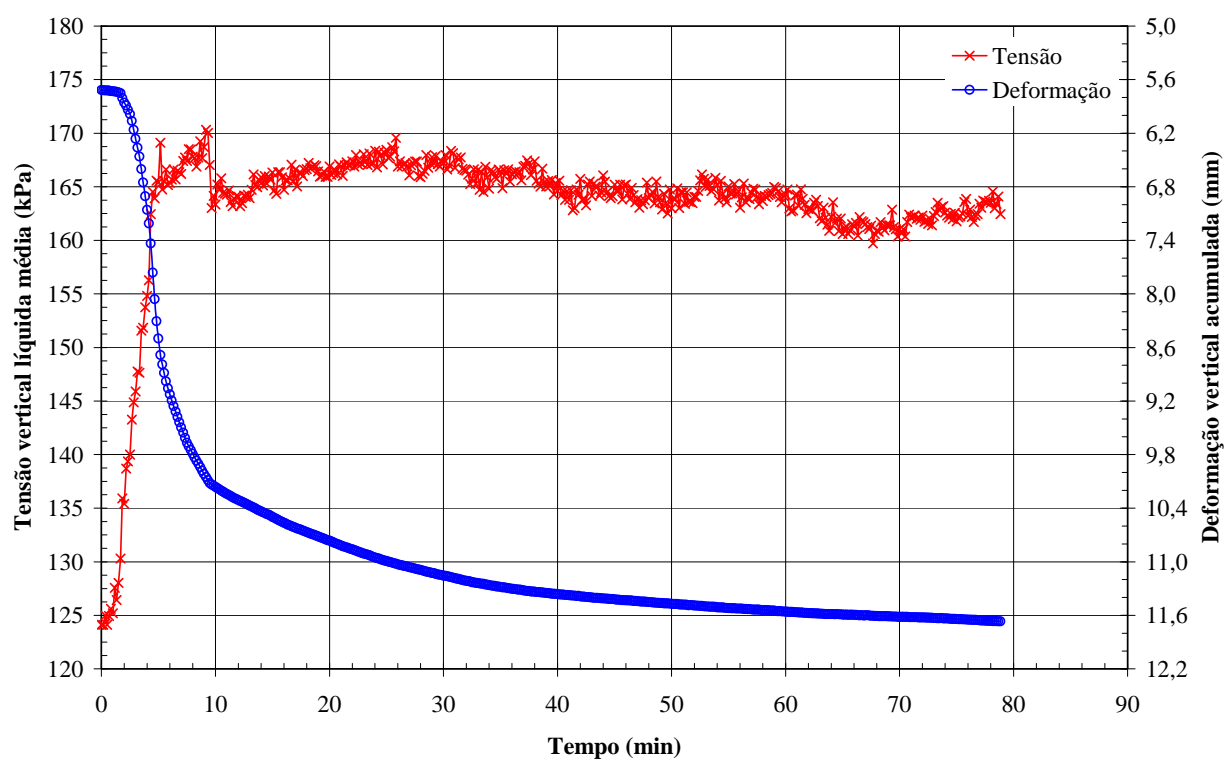


Figura I.24 - Ensaio Bonito: estágio 4 de carregamento

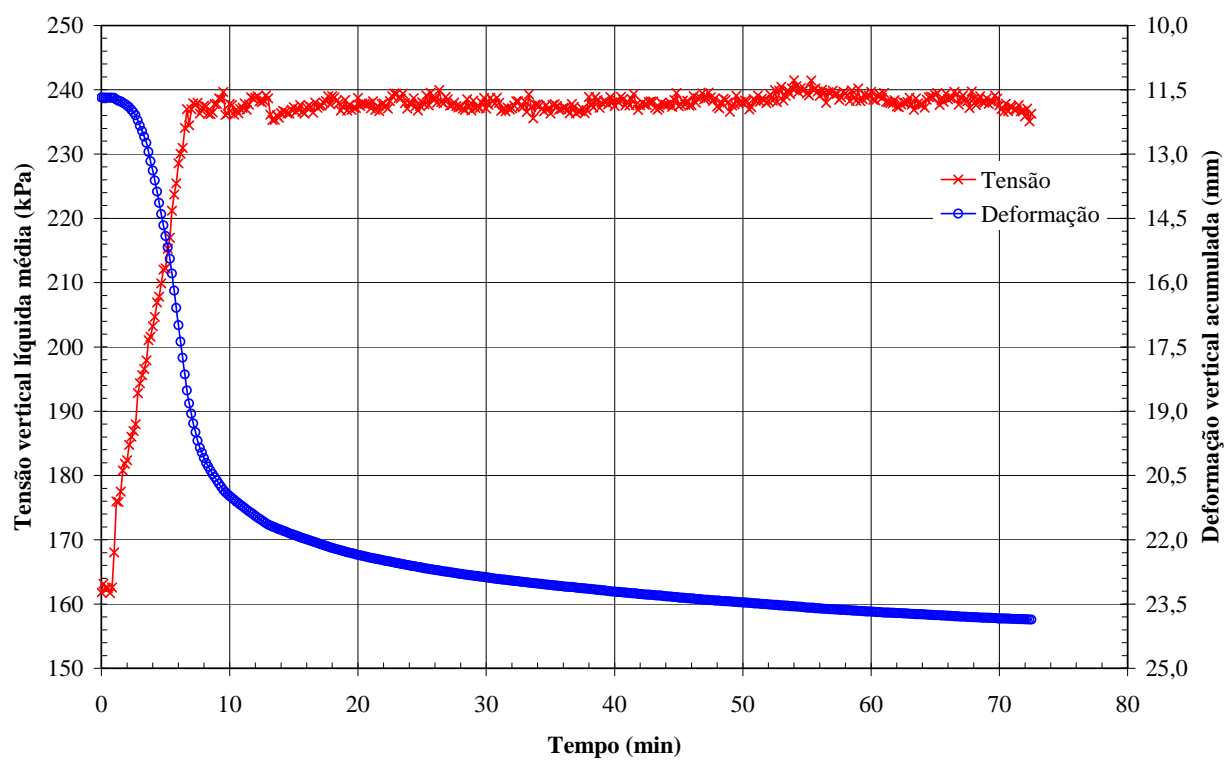


Figura I.25 - Ensaio Bonito: estágio 5 de carregamento



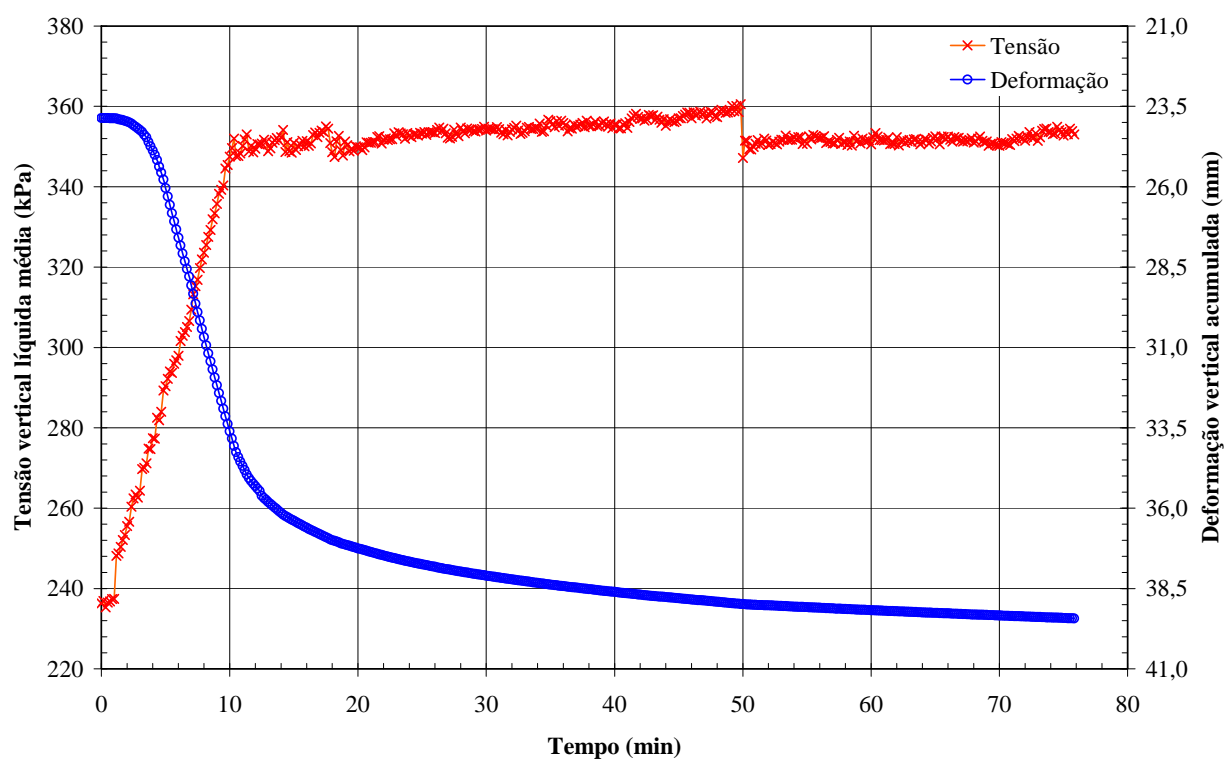


Figura I.26 - Ensaio Bonito: estágio 6 de carregamento

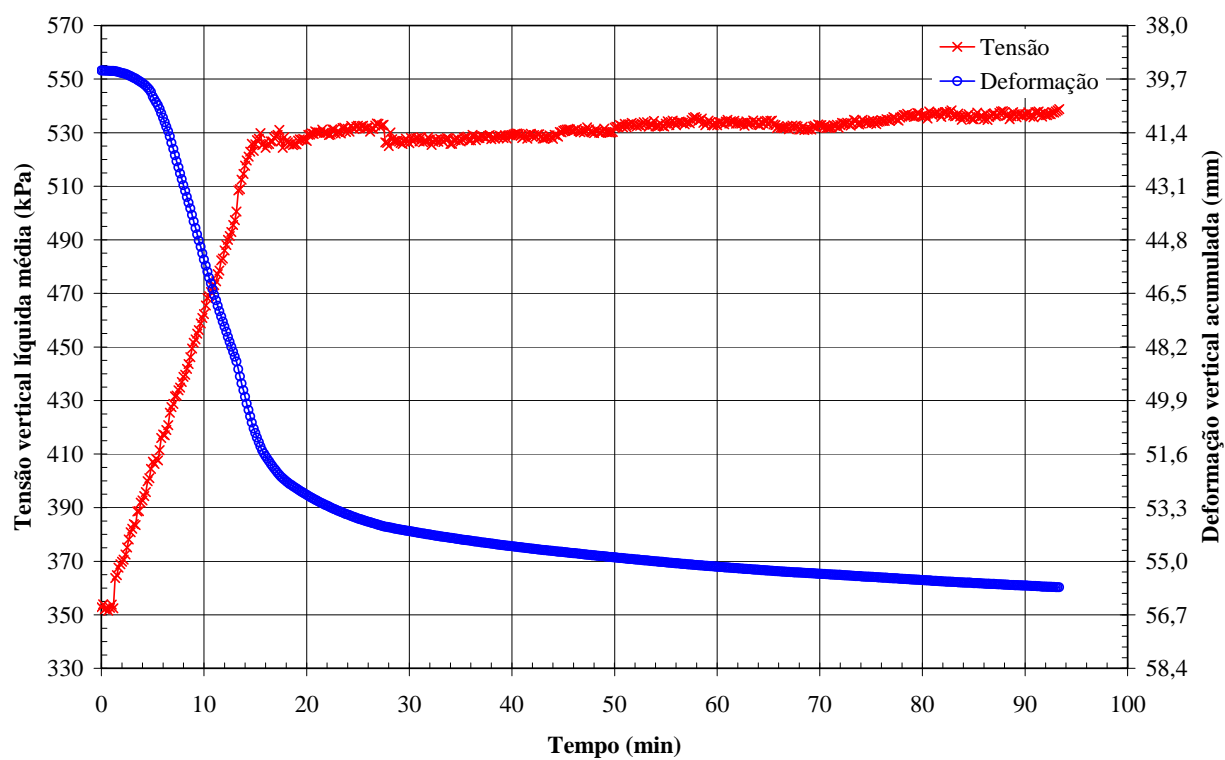


Figura I.27 - Ensaio Bonito: estágio 7 de carregamento

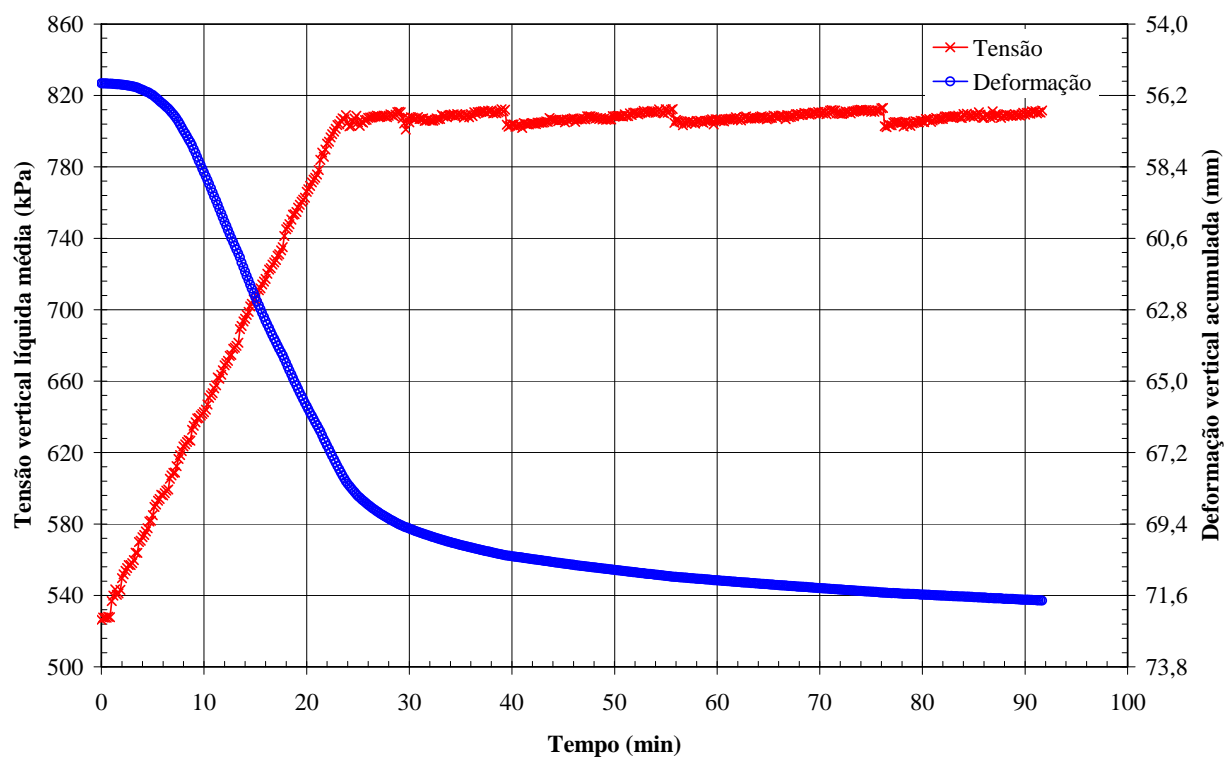


Figura I.28 - Ensaio Bonito: estágio 8 de carregamento

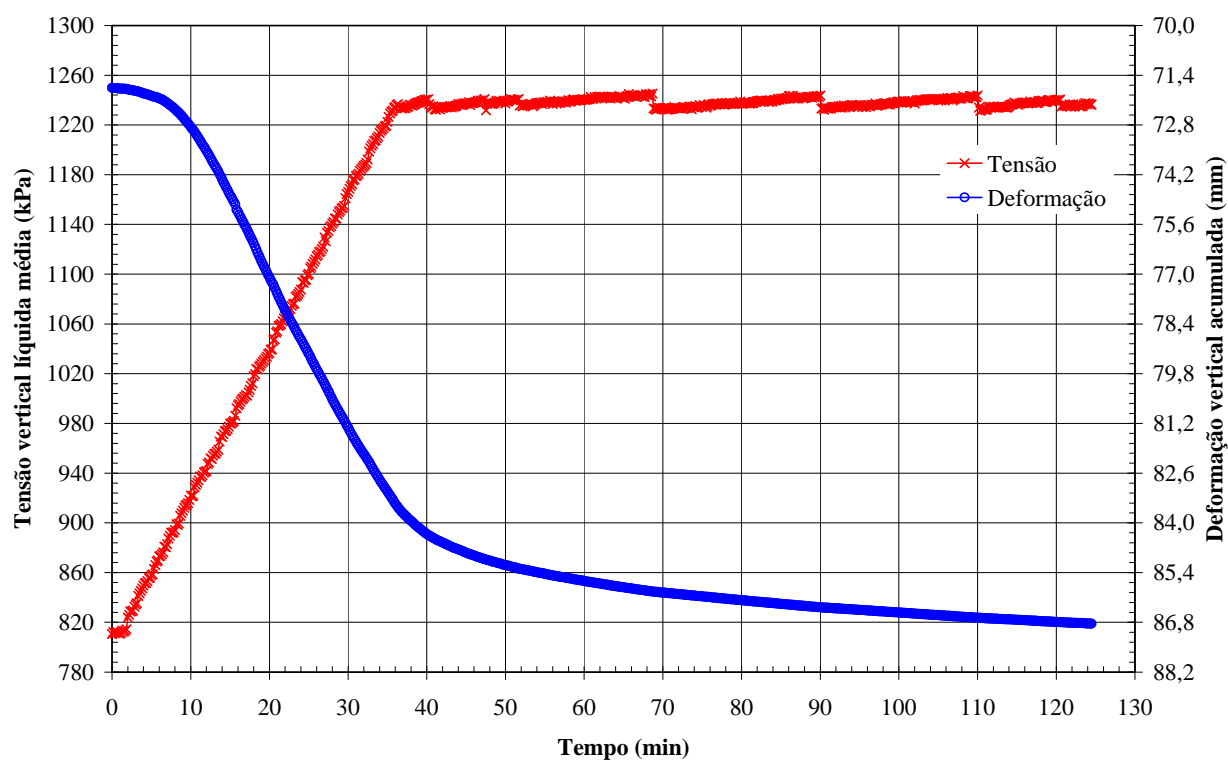


Figura I.29 - Ensaio Bonito: estágio 9 de carregamento

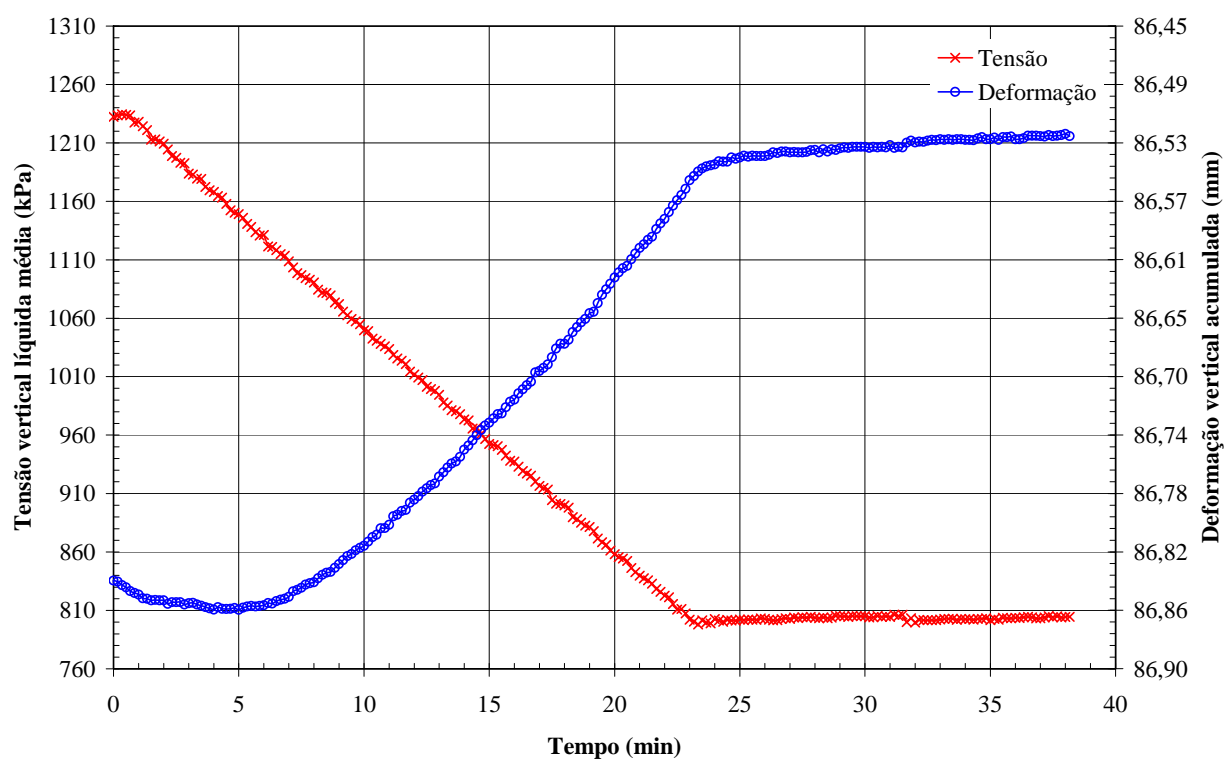


Figura I.30 - Ensaio Bonito: estágio 1 de descarregamento

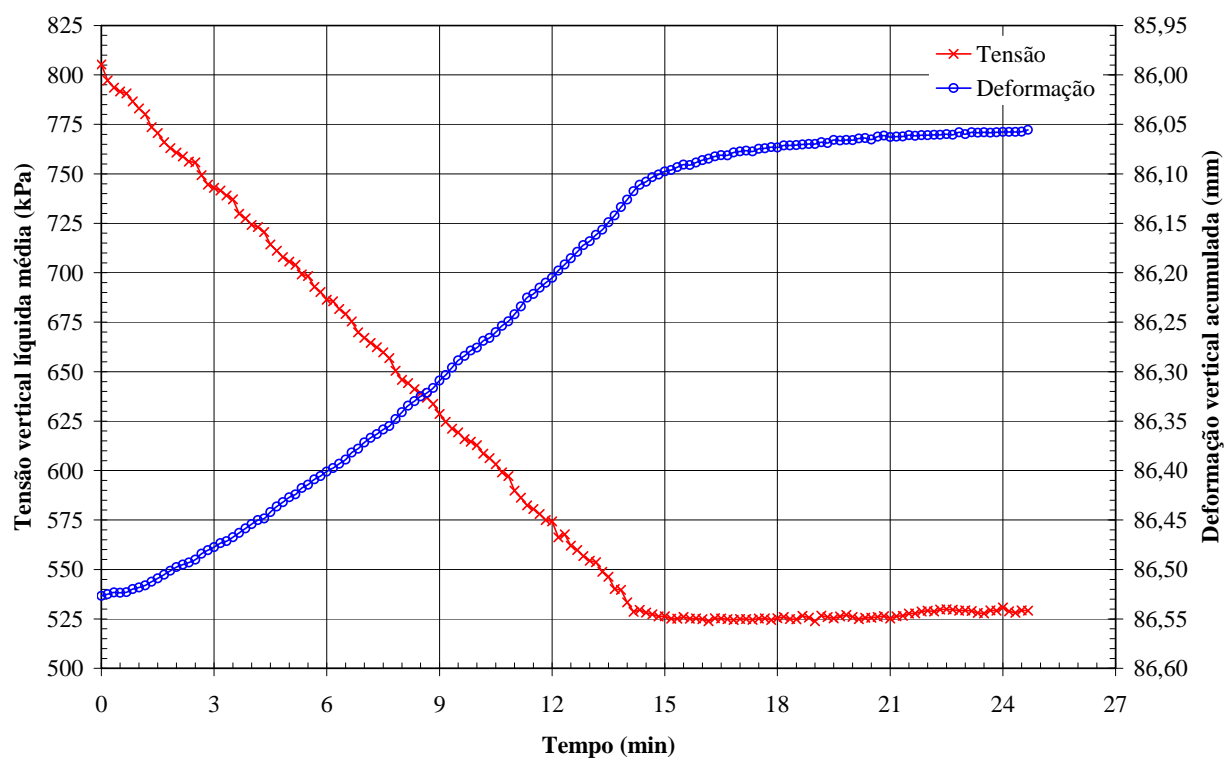


Figura I.31 - Ensaio Bonito: estágio 2 de descarregamento

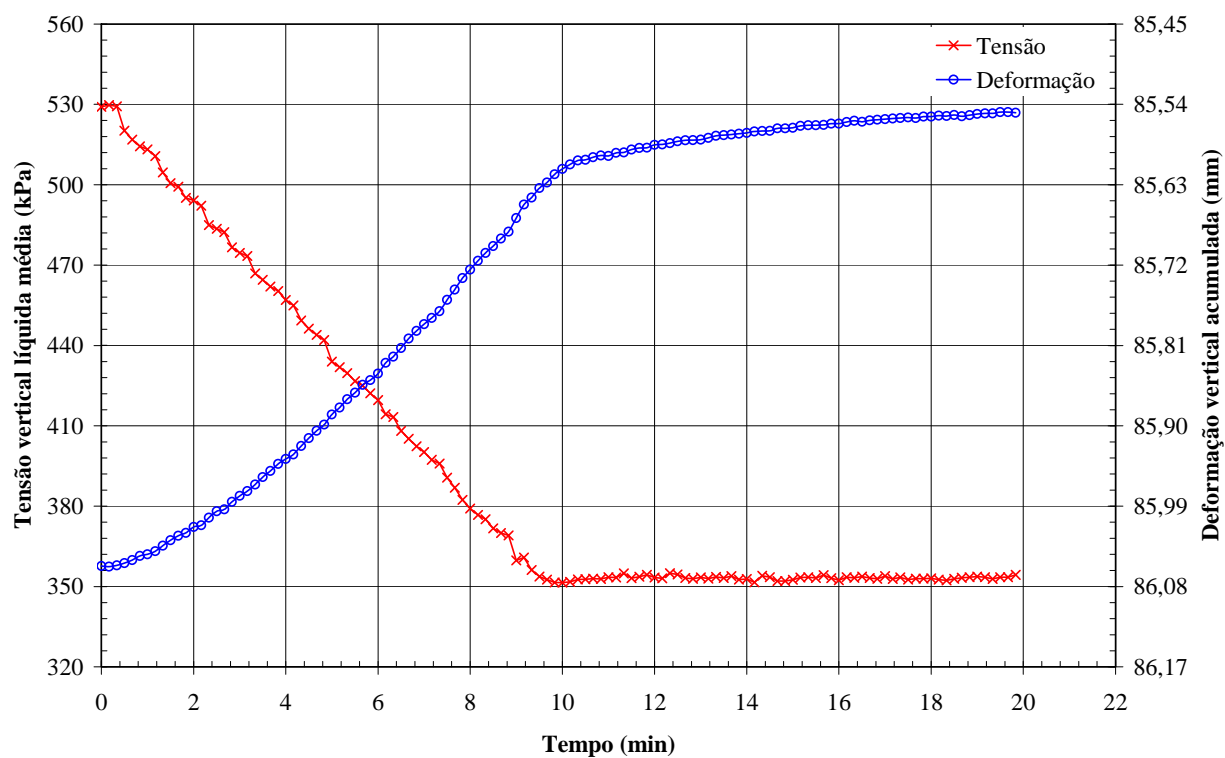


Figura I.32 - Ensaio Bonito: estágio 3 de descarregamento

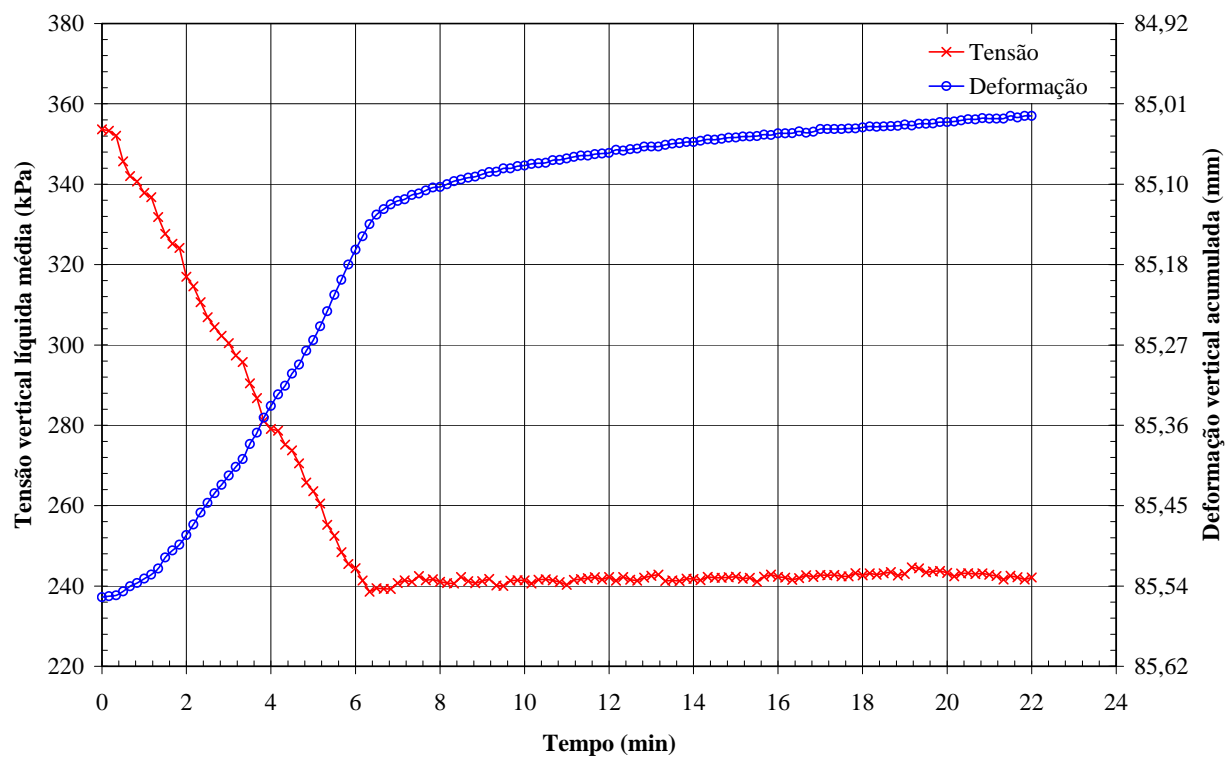


Figura I.33 - Ensaio Bonito: estágio 4 de descarregamento

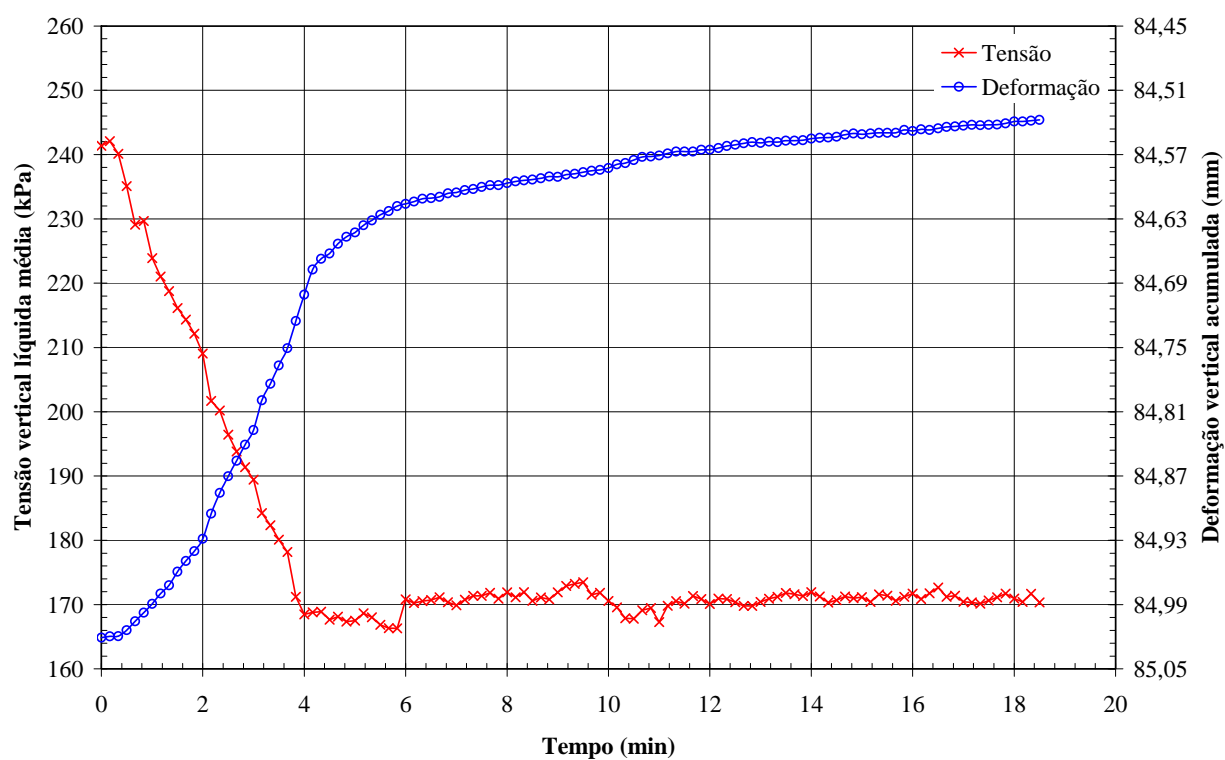


Figura I.34 - Ensaio Bonito: estágio 5 de descarregamento

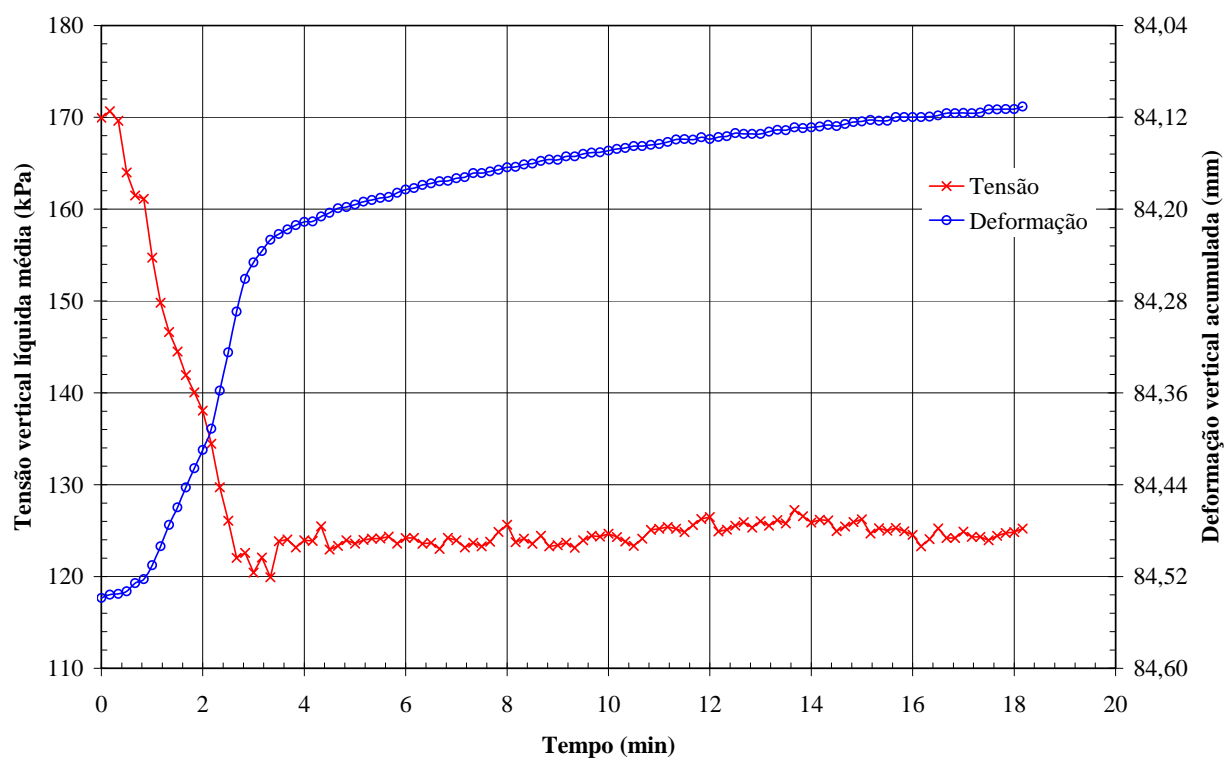


Figura I.35 - Ensaio Bonito: estágio 6 de descarregamento

### I.2.2. Curvas força de atrito vs força vertical total

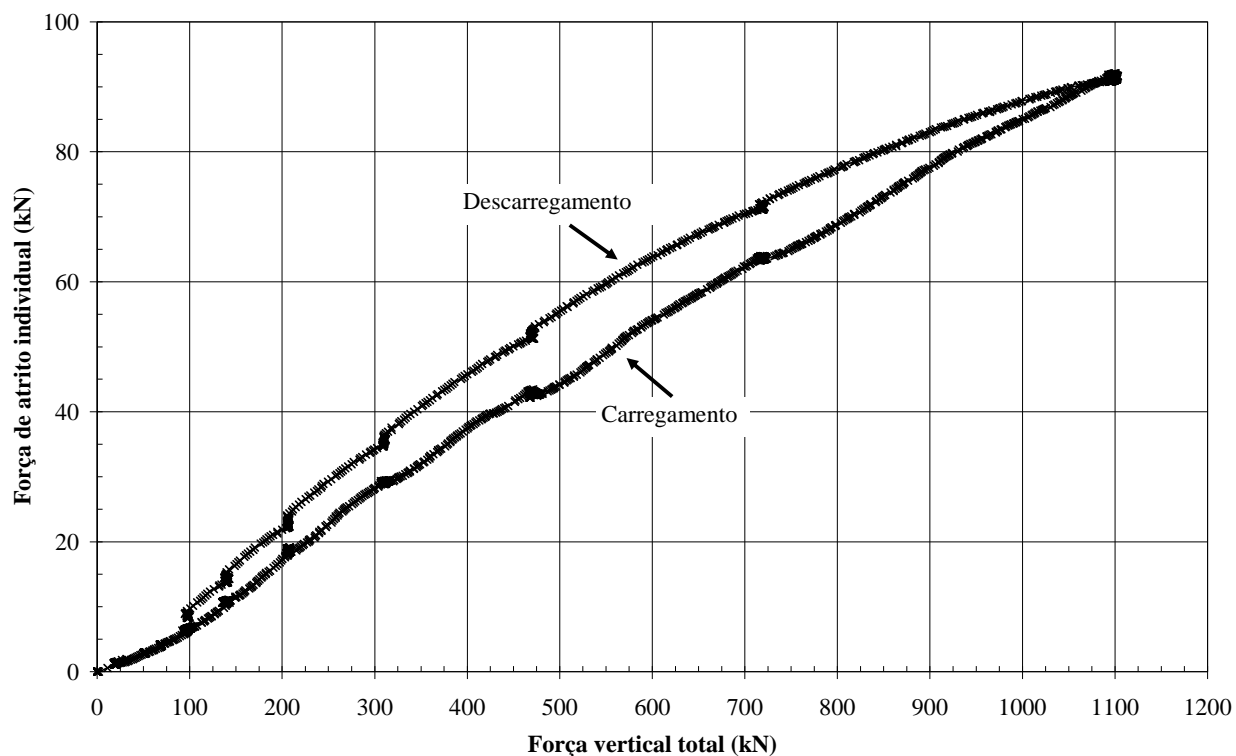


Figura I.36 - Ensaio Bonito: força de atrito medida pela Célula de Carga 1

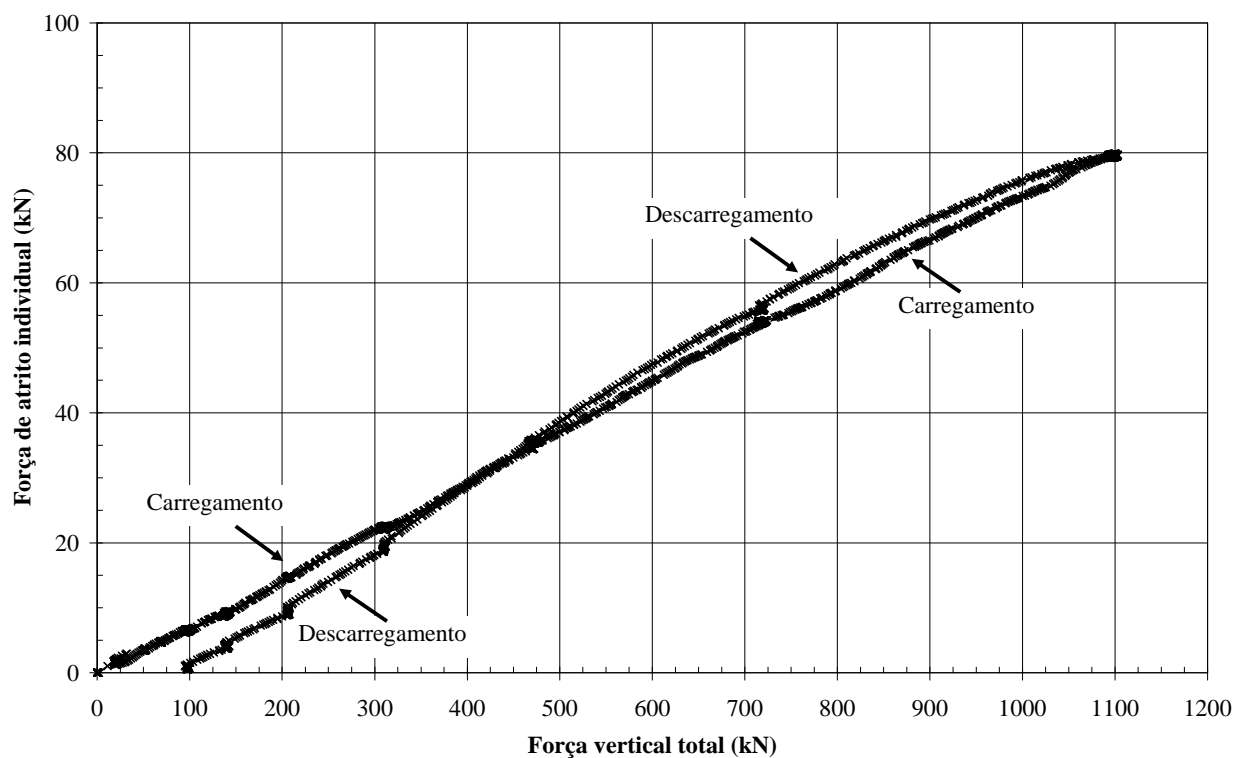


Figura I.37 - Ensaio Bonito: força de atrito medida pela Célula de Carga 2

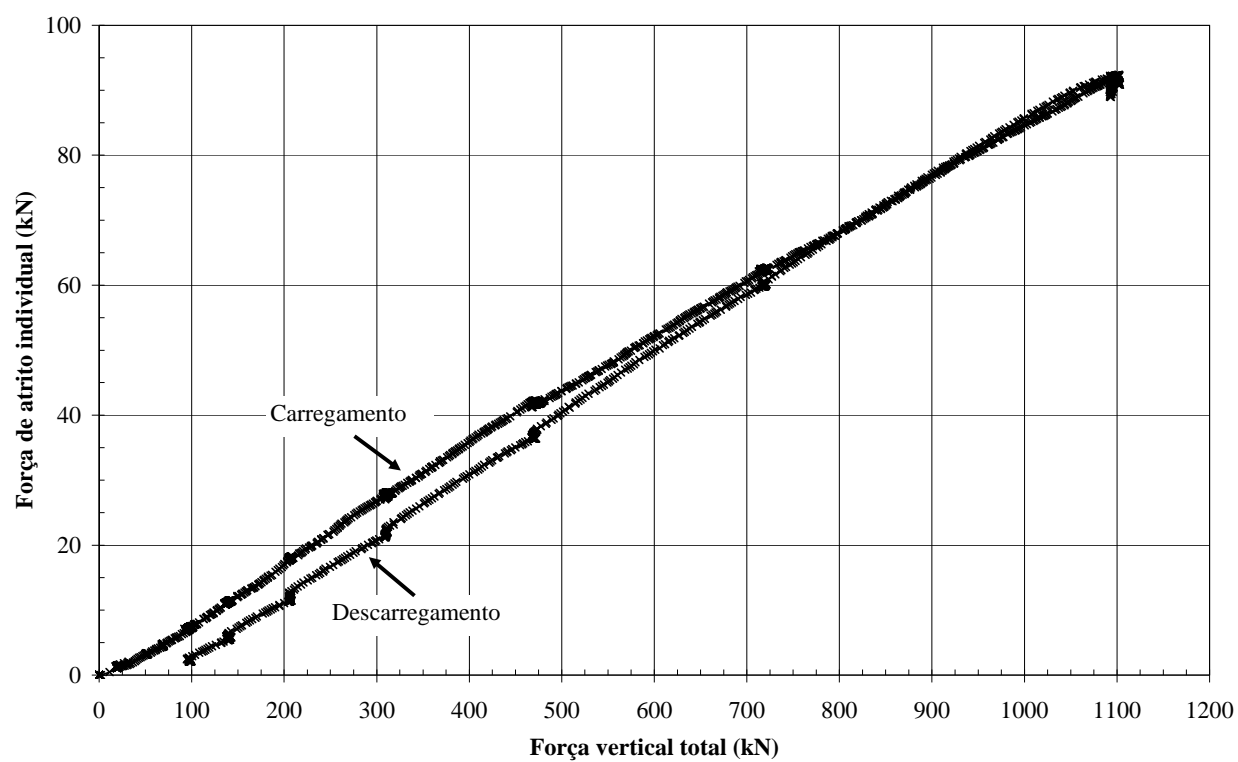


Figura I.38 - Ensaio Bonito: força de atrito medida pela Célula de Carga 3